

УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ ВОЛОГОСТІ ОСУШУВАНИХ ҐРУНТІВ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВІДБОРУ ВОЛОГИ КОРЕНЯМИ ВИРОЩУВАНИХ КУЛЬТУР*

Г.В. ВОРОПАЙ

Інститут гідротехніки і меліорації НААН

Визначено основні підходи до розробки функцій відбору вологи коренями рослин та проведено аналіз їхніх параметрів, які характеризують формування режиму вологості кореневого шару ґрунту. Наведено структурні функції розподілу поглинання вологи коренями для багаторічних трав та кукурудзи, отримані в результаті багаторічних натурних досліджень, які враховують особливості відбору вологи коренями вирощуваних культур протягом вегетаційного періоду.

Ключові слова: евапотранспірація, транспірація, евапорація, індекс листкової поверхні, кореневий шар ґрунту

* Роботу виконано під науковим керівництвом кандидата технічних наук М.В. Яценка.

© Г.В. Воропай, 2010

Меліорація і водне господарство. 2010. Вип. 98

Вступ. Управління вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур є головним завданням меліорації осушуваних ґрунтів. У сучасних умовах реформованого аграрного сектору необхідність поєднання інтенсифікації сільськогосподарського виробництва з екологічними вимогами на меліорованих територіях вимагає зміни підходів до їхнього обґрунтування. Для цього необхідно враховувати технологічно-технічні, економічні та соціальні фактори і одночасно мати інформацію про енергетичний стан вологи в різних частинах системи ґрунт—рослина—атмосфера.

З метою підвищення ефективності використання осушуваних земель в Інституті гідротехніки і меліорації розроблено технологію комбінованого регулювання вологості ґрунту, в основу якої покладено алгоритм комбінованого регулювання, що включає окремі функціональні елементи попереджувального, неперервного і циклічного шлюзування [1].

Мета досліджень. Для розрахунку технологічних параметрів алгоритму комбінованого регулювання створено інформаційне забезпечення. За функціональними ознаками інформаційне забезпечення поділяється на шість блоків. У перших трьох блоках (метеорологічний, ґрунтовий, біологічний) формується нормативно-довідкова інформація. Метеорологічний блок відображає вплив атмосфери за допомогою урахування потенційної транспірації. Необхідні дані, пов'язані з особливостями росту вирощуваних культур, формуються в біологічному блоці, а саме осереднені дані з листового індексу, потужності кореневої системи за фазами їхнього розвитку і також функції розподілу поглинання вологи. Фільтраційні і гідрофізичні характеристики, в тому числі повна і найменша вологоємкості, які формуються в ґрунтовому блоці, визначають за існуючими довідковими даними або доповнюють польовими визначеннями [2].

Оперативна інформація (наступні три блоки) про фактичні параметри водорегулювання (фактичні РГВ за попередню декаду і вологість ґрунту), параметри росту рослин і поточні метеорологічні параметри для визначення сумарного випаро-

ування формуються за результатами контролю за ходом продукційного процесу на меліорованому полі.

Використання вологозапасів ґрунту відбувається головним чином на евапотранспірацію (сумарне випаровування), тому розподіл її на транспірацію і евапорацію дає змогу більш повно врахувати особливості відбору вологи кореневою системою культур з ґрунтового профілю і формування водного режиму протягом вегетаційного періоду.

Оскільки приблизно 70% води, що надходить на поверхню землі, повертається потім в атмосферу через евапотранспірацію, то межа корінь—ґрунт є головною гідрологічною поверхнею, через яку проходить понад 50% вологи, що бере участь у процесі евапотранспірації [3]. Частка води, яка використовується для синтезу одиниці маси органічної речовини, мізерна порівняно з величиною транспірації, а відтак споживання з ґрунту води рослинами визначається переважно інтенсивністю транспірації, яка і є показником вологозабезпеченості сільськогосподарських культур.

Аналіз літературних джерел показав, що для знаходження величини транспірації існують два підходи. В першому разі, при незначній густоті стояння рослин та просторово розрідженій кореневій системі, не враховується вертикальний розподіл вологи і вихідне рівняння вологопереносу записується в полярних координатах. У другому разі, за високого проєкційного покриття рослинами поверхні ґрунту та високої щільності коріння, горизонтальним потоком нехтують і розглядають лише вертикальний вологообмін.

Детальні дослідження поглинання вологи коренями рослин почалися з робіт W.R. Gardner [3]. Корінь рослини розглядався як циліндр нескінченної довжини з однаковим радіусом і здатністю до поглинання вологи. Припускалося, що ґрунтова волога може переміщуватися в радіальному напрямку. Експериментально визначена кількість коренів на певній глибині перевищувала розрахункову, що частково пояснюється тим, що величина потенціалу в середині кореня приймалася по-

стійною. Н.М. Taylor, В. Klepper експериментальним шляхом перевірили припущення W.R. Gardner, які лягли в основу при отриманні залежності радіального потоку вологи до кореня. D.A. Spriet, як і W.R. Gardner, Н.М. Taylor, пропонує знаходити транспірацію, розглядаючи потік із ґрунту до кореневої системи в радіальному напрямку [3].

Цю обставину врахували M.N. Nimah і R.J. Hanks [4]. Використання визначеної ними функції дає змогу прогнозувати зміну вологості по глибині кореневого шару ґрунту. Але в цій моделі не враховано динаміку росту кореневої системи.

Вищезгадана модель модифікована R.A.Feddes [5]. Поглинання вологи коренями рослин запропоновано визначати залежно від тиску ґрунтової вологи і максимальної швидкості поглинання. Такі характеристики, як щільність коріння, їхній розподіл, довжина тощо, котрі змінюються з глибиною і у часі, не враховуються. Кореневу систему характеризує лише глибина кореневої зони.

Дослідженнями [6] встановлено, що розподіл поглинання вологи по глибині ґрунтового профілю в основному залежить від вологості ґрунту.

І.І. Судніцин [7] експериментально обґрунтував існування пропорційної залежності між концентрацією коріння і швидкістю відносних витрат води з даного шару ґрунту. Для оцінки вологозабезпеченості рослин, які ростуть на ґрунті з неоднорідним профілем, де концентрація коренів, гідрофізичні властивості і вологозапаси змінюються по глибині, пропонується використовувати інтегральну модель.

Г.І. Афанасик [8] також визначає функцію поглинання вологи кореневою системою залежно від маси коріння і додатково враховує проникність стінок кореня та потенціал ґрунтової вологи.

С.В. Нерпін [9] використовує припущення, що величина дисипації енергії при русі вологи в кореневій системі мала порівняно з дисипацією енергії за її переходу з ґрунту в коріння рослин; гранична всмоктувальна сила кореневої системи ви-

значається сортовими особливостями рослин, фазою їхнього розвитку і не залежить від метеорологічних умов.

При знаходженні величини транспірації З.М. Дубровський, М.Г. Хублярян враховують біологічні властивості рослин, метеорологічні та інші зовнішні фактори шляхом вводу відповідної емпіричної функції [10].

У роботі [11] запропоновано розраховувати інтенсивність поглинання вологи залежно від коефіцієнта водопроникності стінок кореня, площі поверхні поглинання, об'єму частини кореня, що поглинає, і потенціалу ґрунтової вологи у ризосфері кореня, температури та концентрації розчинених речовин.

З розглянутих функцій поглинання лише функція W.N. Herkelrath [12] була найбільш експериментально перевірена. Запропоновано напівемпіричну формулу, яка базується на припущенні, що градієнт потенціалу ґрунтової вологи у ризосфері коренів незначний. Отримані результати добре узгоджуються з результатами робіт [3]. Крім того, в обох роботах показано, що основний опір поглинанню вологи має місце в коренях за незначного опору потокові вологи з боку ксилеми коренів.

Функція поглинання T.J. Molz [3] аналогічна функції W.N. Herkelrath [12].

При визначенні швидкості поглинання вологи коренями рослин автори враховують крім властивостей самої рослини також і гідравлічну провідність ґрунту, кліматичні фактори та доступність вологи в кореновому шарі ґрунту [13].

Дослідниками представлено експериментальні докази того, що опір кореневої системи звичайно домінує відносно до опору ґрунту навколо коріння. На думку F.J. Molz, усі функції поглинання, котрі враховують лише характеристики ґрунтів, є концептуально помилковими [3, 14].

Як бачимо, більшість функцій поглинання розроблено на макроскопічному, а не мікроскопічному підході. Очевидно, що недоцільно розробляти моделі вологопереносу в ґрунтах, які містять корені, якщо розглядати окремо вологоперенос до кожного кореня всієї кореневої системи рослини, оскільки

детальне описання геометрії кореневої системи дати практично неможливо, тим більше, що вона змінюється з часом, а надходження вологи в корені залежить від їхньої проникності, яка змінюється вздовж кореня.

Загалом було розглянуто 24 функції поглинання вологи, в яких враховується 66 параметрів. Серед них такі, як провідність коренів на одиницю їхньої довжини, функція щільності, гідравлічний опір, відносна питома поверхня, площа вбираючої поверхні, радіус, коефіцієнт водопроникності стінок кореня, функція і коефіцієнт, які враховують властивості рослини, безрозмірні змінні, константи, емпіричні параметри та ін. Тому застосування більшості функцій, які отримані для окремих видів культур і типів ґрунтів, обмежується складністю визначення їхніх вихідних параметрів, у зв'язку з чим ці функції не завжди можливо використовувати в практиці. У більшості випадків відсутні дані їхньої безпосередньої дослідної перевірки.

Слід зазначити, що аналіз даних функцій не дає остаточної і однозначної відповіді про доцільність врахування тих або інших факторів як визначальних, що зумовлюють формування режиму вологості ґрунту.

Тому при проведенні комплексних натурних досліджень на дослідно-виробничих ділянках Ірпінської меліоративної системи та меліоративної системи «Іква» враховували, перш за все, простоту та надійність отримання необхідної експериментальної інформації з метою забезпечення цих моделей у виробничих умовах.

Результати. Натурні дослідження проводили з використанням польової тензіометричної установки (ПТУ), конструкцію якої розроблено в Інституті гідротехніки і меліорації (М.В. Яцик, С.С. Коломієць). Установка має комплекс лізіметрів з непорушеною структурою ґрунту зі встановленими в них пошарово по вертикалі датчиками (тензіометрами) та керамічними зондами живлення, вимірювальний блок манометрів, блок контролю тензіометрів та блок контролю і дозування системи живлення.

На одному з лізиметрів пошарова подача води відсутня, причому вертикальні розміри його відповідають максимально допустимому РГВ (1,1–1,2 м). Подача води в зазначений лізиметр здійснюється лише з нижньої його частини за допомогою блока керамічних зондів живлення, які формують насичено-ненасичену зону, адекватну польовій. Наведена конструкція дає змогу дослідити закономірності водоспоживання рослин в умовах лімітованої водоподачі.

Крім того, протягом вегетаційного періоду на одному із лізиметрів з пошаровою водоподачею імітувався рослинний покрив з метою забезпечення адекватних умов затінення ґрунту, однак рослини на ньому не вирощували. У процесі водобалансових розрахунків на даному лізиметрі визначали евапорацію.

Режим вологості на полі і в лізиметрах з метою перевірки його відповідності контролювали за даними вимірювань тензіометрами тиску порової води в 0,1-метрових шарах.

У процесі експлуатації ПТУ щодоби вимірювали витрати води по кожному зонду живлення, тиск порової води в 0,1-метрових шарах ґрунту в лізиметрах та на полі, фіксували поточний РГВ.

Отримано інформацію для визначення:

- потенційної евапотранспірації з подальшим розподілом її на окремі складові — транспірацію та евапорацію;
- закономірностей поглинання вологи кореневою системою вирощуваних сільськогосподарських культур по глибині кореневого шару ґрунту (вихідні дані для знаходження виду і параметрів функції розподілу поглинання вологи кореневою системою протягом вегетаційного періоду).

Безпосередньо на дослідно-виробничій ділянці проводили фіксацію поточних метеорологічних факторів (опади, температура, відносна вологість повітря), які є основними факторами, що визначають кількісно вологозабезпеченість сільськогосподарських культур.

Наявність більш як 60-річного ряду спостережень за атмосферними опадами (дані метеостанції, м. Дубно) та матеріали наших досліджень дали можливість отримати криву забез-

печеності атмосферними опадами за вегетаційний період (рис. 1).

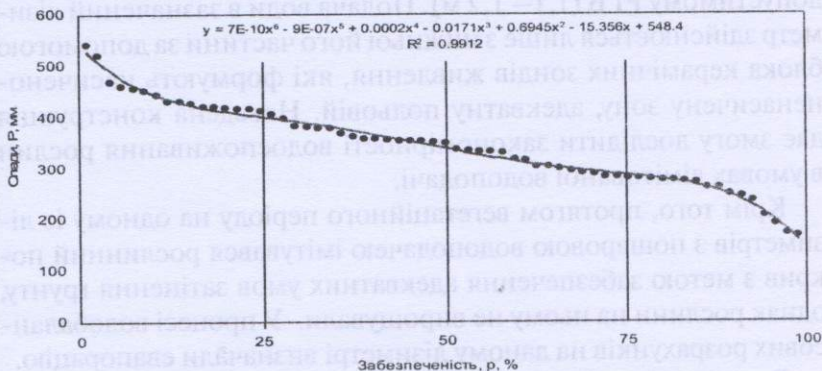


Рис. 1. Крива забезпеченості атмосферними опадами за вегетаційний період на дослідно-виробничій ділянці системи «Іква»

На дослідній ділянці системи «Іква» визначено забезпеченість атмосферними опадами у вегетаційні періоди років досліджень. За розглянутий період було 7 років дуже сухих (1990, 1992, 1994, 1995, 1996, 1999, 2002), 6 — дуже вологих (1989, 1991, 1993, 1998, 2001, 2006), 4 — вологих (1997, 2000, 2004, 2007), 1 — середній (2003) та 1 — сухий (2005) за кількістю опадів. Характер розподілу опадів за місяцями нерівномірний: у багатоводні роки піки дощів припадають в основному на липень, а бездощові періоди спостерігаються частіше у серпні та вересні.

На дослідно-виробничій ділянці відібрано зразки для визначення водно-фізичних характеристик і встановлено структуру ґрунтового профілю. Шар ґрунту до глибини 0,65–0,75 м складено темно-коричневим торфом, який сильно розклався, коефіцієнт фільтрації 0,5 м/добу. Наступний шар потужністю 0,2 м представлений суглинком мілким, пилуватим, карбонатним, голубувато-сірим, на межі супіску, має м'яку і пластичну консистенцію з коефіцієнтом фільтрації 0,1 м/добу. На глибині 0,85–0,95 м — мергель світло-сірого кольору (коефіцієнт фільтрації 0,001 м/добу).

Оскільки відносна поверхня листків або листковий індекс є необхідним параметром для розрахунків сумарного випаровування з розподілом на транспірацію та евапорацію, то протягом вегетаційного періоду проводили виміри цієї величини. Крім цього фіксували динаміку росту кореневої системи вирощуваних культур.

Для лугових фітоценозів використовували ваговий метод визначення листкового індексу за Л.Н. Алексеєнко. За цією методикою для знаходження листкового індексу визначено перехідні коефіцієнти. Листки (у сирому або у сухому стані) зважували, а потім розраховували площу листкової поверхні.

На одній із дослідних ділянок протягом років досліджень вирощували багаторічні трави. Згідно з методикою проведення досліджень зважували листки без стеблин, відібраних з ділянок розміром $0,25 \times 0,25$ м у 5-разовій повторюваності.

1. Біометричні характеристики багаторічних трав

(за даними комплексних натурних досліджень на дослідно-виробничих ділянках меліоративної системи «Іква»)

| Рік досліджень та його забезпеченість опадами, % | Листковий індекс | Урожайність, ц/га | Рівень ґрунтових вод, м | Висота травостою, м | Глибина проникнення кореневої системи, м |
|---|------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|--|
| 1989 – 15 1991 – 6 1993 – 12 1998 – 1 2001 – 3 2006 – 14 | 10,8–13,4 | 43,5–49,3 | 0,13–1,18 | 0,48–1,05 | $h_{om}=(0,15-0,2)$ $h_{max}=(0,35-0,45)$ |
| 1990 – 87 1992 – 99 1994 – 81 1995 – 88 1996 – 90 1999 – 92 2002 – 89 | 5,40–9,10 | 27,5–36,8 | 0,9–1,36 | 0,48–1,0 | $h_{om}=(0,18-0,2)$ $h_{max}=(0,35-0,45)$ |

Біометричні характеристики багаторічних трав, визначених на дослідно-виробничих ділянках меліоративної системи (ОЗС) «Іква» для різних за водністю років за роки досліджень, наведено в табл. 1, з якої видно, що наростання наземної маси багаторічних трав у багатоводні роки проходило більш інтенсивно порівняно з сухими роками. Значення листового індексу коливалося в межах від 10,8 до 13,4 у багатоводні роки і від 5,4 до 9,10 – у посушливі (рис. 2). Відповідно і середня урожайність багаторічних трав становила в середньому 46,4 ц/га у багатоводні роки і 31,3 ц/га – у посушливі.

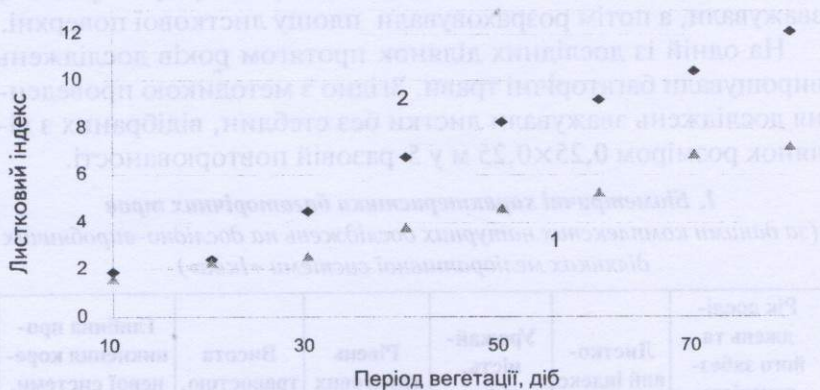


Рис. 2. Динаміка наростання середніх величин листового індексу багаторічних трав для сухих (1) та багатоводних (2) років

Однак у окремі багатоводні роки спостерігалось значне зниження урожайності багаторічних трав. Так у 2006 р. (забезпеченість опадами 14%) урожайність багаторічних трав першого укосу становила 16,7, а другого – 43,5 ц/га. Відповідно листовий індекс 4,2 і 10,8 (рис. 3).

Зниження урожаю багаторічних трав першого укосу насамперед пояснюється нерівномірністю розподілу опадів протягом вегетаційного періоду розглянутого року досліджень. У травні, коли відбувалося формування зеленої маси багаторічних трав першого укосу, кількість опадів становила всього 28,3 мм, тоді як у червні та липні їхня кількість була відповід-

но 99,9 і 210,4 мм. Відповідно і висота травостою коливалася у значних межах — від 0,48 до 1,05 м.

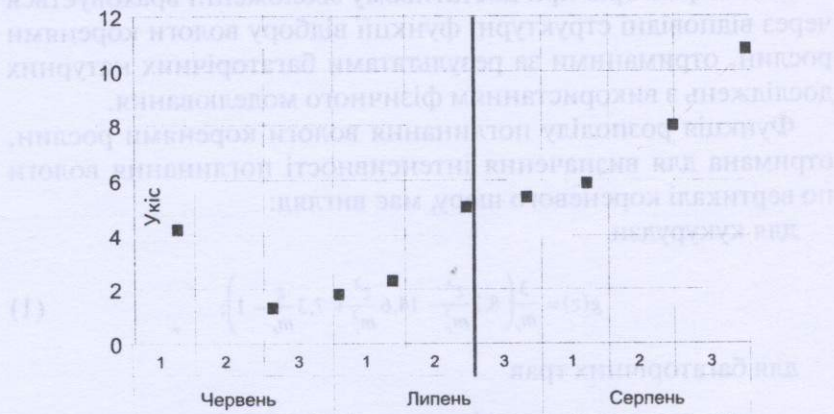


Рис. 3. Динаміка листового індексу багаторічних трав (меліоративна система «Іква», 2006 р.)

Коренева система рослини, яка безперервно формується протягом усього періоду її життєдіяльності, визначається індивідуальними особливостями рослини. В природних умовах основне значення мають властивості ґрунту, його щільність, умови живлення та вологості. Щодо росту кореневої системи багаторічних трав, то за роки досліджень було встановлено, що основна маса коренів сконцентрувалася в горизонтах ґрунту, де є найкращі умови для поглинання вологи, кисню та поживних речовин. Потужність кореневої системи багаторічних трав протягом років досліджень залишалася практично постійною. Найбільшу масу коренів відмічено до глибини 0,15–0,20 м. Максимальну глибину проникання одиничних коренів зафіксовано на глибині 0,6 м.

Вертикальний розподіл вологості в межах активного шару ґрунту визначається особливостями відбору вологи коренями рослин. Інтенсивність і структура відбору вологи коренями залежать від напруженості метеорологічних умов, геометрії роз-

повсюдження і біологічних властивостей коренів, поживного і водно-повітряного режимів ґрунту. В комплексі вплив зазначених факторів при достатньому зволоженні враховується через відповідні структурні функції відбору вологи коренями рослин, отриманими за результатами багаторічних натурних досліджень з використанням фізичного моделювання.

Функція розподілу поглинання вологи коренями рослин, отримана для визначення інтенсивності поглинання вологи по вертикалі кореневого шару, має вигляд:

для кукурудзи

$$g(z) = \frac{3}{m_r} \left(8,3 \frac{z^3}{m_r^3} - 14,6 \frac{z^2}{m_r^2} + 7,3 \frac{z}{m_r} - 1 \right); \quad (1)$$

для багаторічних трав

$$g(z) = \frac{4z}{m_r^2} \left(4,6 \frac{z^2}{m_r^2} - 5,4 \frac{z}{m_r} + 0,8 \right). \quad (2)$$

2. Водообмін у зоні аерації

(за даними натурних досліджень на дослідно-виробничих ділянках меліоративної системи «Іква»)

| Забезпеченість опадами, % | Регулювання водного режиму ґрунту, м ³ /га | | | |
|---------------------------|---|---|---|--|
| | за традиційною технологією | | за технологією комбінованого регулювання | |
| | Сумарне випаровування за вегетаційний період (середнє за роки досліджень) | Інфільтрація до РГВ за вегетаційний період (середнє за роки досліджень) | Сумарне випаровування за вегетаційний період (середнє за роки досліджень) | Інфільтрація до РГВ за вегетаційний період (середнє за роки досліджень), |
| 1–15 | 549,3 | 597,8 | 195,1 | 167,7 |
| 81–99 | 1269,3 | 313,9 | 453,3 | 93,0 |

При реалізації алгоритму комбінованого регулювання суттєво зменшилося випаровування з РГВ, а на транспірацію ви-

трачалися вологозапаси, заакумульовані у зоні аерації (табл. 2). Водночас зменшилися невіроби́ні витрати води на евапорацію завдяки ліміту водоподачі з нижніх горизонтів.

Акумуляція атмосферних опадів у верхніх горизонтах кореневого шару шляхом зниження РГВ та збільшення водоаккумуляційної ємкості зони аерації дала можливість суттєво зменшити або і зовсім виключити промивний режим. Інфільтрація опадів до РГВ, як видно з табл. 2, була меншою в середньому в 3,4–3,6 рази.

Дослідно-виробнича перевірка свідчить про адекватність розроблених моделей, що дає змогу використовувати їх для управління режимом вологості в кореновому шарі ґрунту.

Висновки. Реалізація алгоритму комбінованого регулювання в дослідно-виробничих умовах, як показали результати досліджень, дає змогу суттєво зменшити витрати води на випаровування і більш ефективно використовувати вологозапаси кореневого шару ґрунту.

Врахування просторових особливостей процесів поглинання води кореннями рослин дає змогу адекватно прогнозувати режим вологості кореневого шару ґрунту і на цій основі проводити осушувально-зволожувальні заходи та більш обґрунтовано й економно використовувати наявні водні ресурси, мінімізувати можливий негативний вплив інфільтраційних процесів у зоні аерації на забруднення ґрунтових вод.

1. Яцик М.В., Воронай Г.В. Алгоритм комбінованого водорегулювання на осушувально-зволожувальних системах гумідної зони України // Меліорація і водне господарство. — 2008. — Вип. 96. — С. 73–80.

2. Яцик М.В., Ковальчук В.П., Коломієць С.С. Принципи створення бази даних для інформаційного забезпечення технологій регулювання водного режиму ґрунтів // Меліорація і водне господарство. — 2004. — Вип. 91. — С. 154–163.

3. Molz F.J. Models of water transport in the soil-plant system: a review // Water Resour. Res. — 1981. — V.17, № 5. — P. 1245–1260.

4. Nimah M.N. and Hanks R.J. Model for estimating soil water plant and atmospheric interrelations. 1. Description and senility // Soil. Ski. Am. Prog. — 1973. — №37. — P. 522–527.

5. Feddes R.A., Kowalik P. and Zaradny H. Simulation of field water use and crop field, centre for agricultural // Publishing and documentation, wakening the Netherlands. — 1978.

6. Голованов А.И., Никольский Ю.Н., Циприс Д.Б., Шабанов В.В. Регулирование водного режима почв на основе детального анализа требований растений // Гидротехника и мелиорация. — 1975. — №7. — С. 93.

7. Судницын И.И., Муромцев Н.А., Гинзбург М.Е., Шеин Е.В. Физические и математические модели движения почвенной влаги при влагопотреблении растений // Тез. докл. Всесоюз. съезда почвоведов. — Минск, 1977. — Т. 1. — С. 121–123.

8. Афанасик Г.И. и др. Комплексное регулирование условий жизни растений на торфяных почвах. — Минск, 1980.

9. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энергомассообмен в системе растение–почва–приземный воздух. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 358 с.

10. Хубларян М.Г. О моделировании переноса влаги и питательных веществ в системе почва–растение // Вопросы управления комплексом факторов жизни растений. — М.: ВНИИГиМ, 1978. — С. 62–50.

11. Philip J.R. The soil-plant-atmosphere continuum in hydrological cycle // Hydrol. Forecasting tech hate. — 1969. — V. 92.

12. Herkelrath W.N., Miller E.E. and Cardner W.R. Water uptake by plants. 2. The root contact model // Soil. Ski. Am. J. — 1977. — №41. — P. 1039–1043.

13. Boonyatharokul W., Walker W. Evapotranspiration under depleting soil moisture // J. of the irrigation and drainage division. — 1979. — P. 391–401.

14. Molz F.J., Remson J. The model of soil water suction by plant roots. Water Resour. Res. — 1970. — № 6.

Определены основные подходы к разработке функций отбора влаги корнями растений и проведен анализ их параметров, характеризующих формирование режима влажности в корнеобитаемом слое почвы. Приведены структурные функции распределения поглощения влаги корнями для многолетних трав и кукурузы, полученные в результате многолетних натуральных исследований и учитывающие особенности отбора влаги корнями выращиваемых культур на протяжении вегетационного периода.

It was specified the main approaches to the design of roots water withdrawal function and carried out the analysis of their parameters, which characterize moisture conditions formation in root zone.