

METODYKA OBLICZANIA NIEDOBORÓW WODNYCH ROŚLIN UPRAWNYCH DLA
CELÓW PROJEKTOWANIA I EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ NAWADNIAJĄCYCH

Wacław Roguski

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, Oddział w Bydgoszczy

WSTĘP

Zmienny przebieg warunków klimatycznych w Polsce wpływa na wahania plonów. W okresach posusznych niedobór wody w glebie powoduje hamowanie przyrostu lub zasychanie liści i całych roślin. Dla przykładu w roku 1979 na glebach piaszczystych zboża jare nie wydały w ogóle ziarna. Równocześnie w okresach letnich mamy duży niedobór wody i dlatego trzeba budować kosztowne zbiorniki retencyjne. Poza tym niedobory energii i duże koszty nawodnień zmuszają nas do oszczędnej i racjonalnej gospodarki wodnej. Należy więc projektować oszczędne zużycie wody przy możliwie wysokich plonach.

W niniejszym artykule przedstawiono metodykę obliczania zapotrzebowania wody do nawodnień roślin uprawnych, opracowaną na podstawie badań w Instytucie Melioracji i Użytków Zielonych i w innych placówkach naukowych w Polsce i za granicą. Oparto ją na bilansie wodnym profilu glebowego z uwzględnieniem opadów, retencji użytecznej gleby, ewapotranspiracji rzeczywistej i odpływów. Przyjęto do bilansowania okresy dekadowe.

PRZEGLĄD METOD WYZNACZANIA NIEDOBORÓW WODNYCH
W KRAJU I ZA GRANICĄ

W latach 1955-1970 posługiwano się głównie metodą Ostromięckiego [9] dla obliczania parowania terenowego na podstawie niedosytów wilgotności powietrza i współczynników hygrometrycznych:

$$E_{Tr} = \beta \cdot \sum d \quad (1)$$

gdzie:

E_{Tr} - ewapotranspiracja rzeczywista,

β - współczynnik hygrometryczny,

Σd - suma niedosytów wilgotności powietrza.

Metoda ta wymaga znajomości lokalnych niedosytów wilgotności powietrza. Ponadto współczynniki β okazały się za wysokie w okresach bardzo suchych i za niskie w okresach wilgotnych.

Następnie Matul [5] opracował metodę obliczania tzw. ewapotranspiracji potencjalnej:

$$E_{Tp} = 0,41 \sqrt{\frac{R}{L}} \cdot \Sigma t \quad (2)$$

gdzie:

E_{Tp} - parowanie potencjalne,

$\frac{R}{L}$ - wskaźnik wodny bilansu radiacyjno-cieplnego,

Σt - suma temperatur.

Centralne Biuro Studiów i Projektów Wodno-Melioracyjnych wprowadziło obliczanie parowania potencjalnego na podstawie wzoru Turca. W założeniu przyjmowano, że tzw. || parowanie || potencjalne jest parowaniem maksymalnym i do tego poziomu należy nawadniać w okresach krytycznych dla roślin. Tymczasem pomiary w ostatnich latach wykazały, że ewapotranspiracja rzeczywista w okresie pełnego rozwoju roślin jest znacznie wyższa, a w okresie początkowym i pod koniec dojrzewania niższa. Wobec tego należy opracować sezonowe współczynniki K dla poszczególnych roślin i ewapotranspirację rzeczywistą obliczać wg wzoru:

$$E_{Tr} = K \cdot E_{Tp}$$

gdzie:

E_{Tr} - ewapotranspiracja rzeczywista,

K - sezonowy współczynnik,

E_{Tp} - ewapotranspiracja potencjalna.

Do czasu ustalenia jednolitego wzoru proponuje się obliczać ewapotranspirację potencjalną według wzoru Penmana w modyfikacji francuskiej [18]:

$$E_{Tp} = n \left\{ \left[G_0 (1 - a) \cdot (0,209 + 0,565) \frac{S}{S_0} + \delta T^4 (0,56 - 0,08 \sqrt{e}) (0,10 + 0,90 \frac{S}{S_0}) \frac{1}{59} \cdot \frac{F'_T}{F_T + 0,65} + 0,26 (e_w - e) \cdot (1 + 0,4 v) \frac{0,65}{F_T + 0,65} \right] \right\} \quad (3)$$

gdzie:

G_0 - promieniowanie słoneczne na górnej granicy atmosfery w cal/cm^{-2} ,

a - albedo = 0,20 (0,15-0,25),

S - dobowe usłonecznienie w godzinach,

S_0 - dobowe usłonecznienie możliwe w godzinach,

σ - $1,18 \cdot 10^{-7} \text{ cal.cm}^{-2} \text{ doba}^{-10} \text{ K}^{-1}$ stała Stefana Boltzmana,

T - temperatura w $^{\circ}\text{K}$,

e_w - prężność pary wodnej nasyconej w temperaturze T - w hPa,

e - prężność pary wodnej aktualnej w hPa,

V - prędkość wiatru w m/s na wys. 10 m,

n - liczba dni w okresie,

F'_T - nachylenie krzywej ciśnienia pary w temperaturze T ,

L - ciepło parowania = $59 \text{ cal.cm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$.

Do tego wzoru Sarnacka opracowała tabele pomocnicze, przez co obliczenia są proste, oparte na dostępnych danych meteorologicznych.

Niektórzy hydrologicy zaczęli stosować wzór Penmana w modyfikacji FAO [2, 3]. Jest on uproszczony, lecz są trudności ze współczynnikami korygującymi, opartymi na stosunku prędkości wiatru w dzień do prędkości w nocy oraz maksymalnej wilgotności powietrza. Dane te w Polsce nie były publikowane.

Badania wykazały, że wielkości ETP obliczone różnymi wzorami różnią się znacznie w sumach rocznych, a ponadto zmienia się stosunek w poszczególnych okresach.

W Bydgoszczy stosunek ETP obliczony wzorem Penmana i Matula zmienia się od 1,25 w kwietniu do 0,89 we wrześniu. Suma roczna ETP Penmana wynosi 0,81 ETP FAO. Oznacza to, iż wielkości ETP są tylko wielkościami wskaźnikowymi i współczynniki roślinne K obliczone dla jednego wzoru nie mogą być mechanicznie zastosowane do innego wzoru.

PROPONOWANA METODA OBLICZEŃ NIEDOBORÓW WODNYCH

W Polsce proponuje się obliczać niedobory wodne w okresach dekadowych i miesięcznych według wzoru:

$$W_n = ETR - P - ERUp + ERUK + H \cdot \text{mm} \quad (4)$$

gdzie:

- Wn - niedobór wody, czyli zapotrzebowanie wody do nawodnień,
 ETr - ewapotranspiracja rzeczywista, aktualna,
 P - opad,
 ERUp - retencja użyteczna łatwo dostępna na początku okresu,
 ERUk - retencja użyteczna łatwo dostępna na końcu okresu,
 H - odpływ.

Obliczenia należy wykonywać dla poszczególnych kompleksów glebowych dla każdej z uprawnych roślin. Niedobór wody dla obiektu będzie sumą niedoborów wody poszczególnych upraw i kompleksów.

Poniżej zostaną omówione metody obliczania poszczególnych składników bilansu.

ETr - ewapotranspiracja rzeczywista. Ewapotranspirację rzeczywistą proponuje się obliczać według wzoru Penmana w modyfikacji francuskiej (wzór 3), stosując roślinne współczynniki sezonowe K:

$$ETr = K_1 \cdot ETP_{\text{Penman}} \quad (5)$$

Można też obliczać na podstawie innych wzorów, np. Matula, Turca lub Baca, lecz wtedy współczynnik K należy zwiększać lub zmniejszać w zależności od stosunków wielkości ETP obliczanych różnymi wzorami.

Dla przykładu, wykorzystując wzór Turca i współczynniki K_1 do wzoru Penmana, stosujemy obliczenia następująco:

$$ETr = K_2 \cdot ETP_{\text{Turc}}, \quad (6)$$

$$K_2 = K_1 \cdot \frac{ETP_{\text{Penman}}}{ETP_{\text{Turc}}}. \quad (7)$$

Współczynniki K są zmienne w czasie. W pierwszej fazie rozwoju (uprawa, siew, wschody) zależą głównie od uwilgotnienia gleby, zwłaszcza od częstotliwości zwilżania powierzchni przez opady lub deszczowanie. Później w miarę wzrostu roślin współczynniki te rosną i zwykle przekraczają 1,0, a pod koniec dojrzewania znowu maleją.

W Polsce należy dążyć do wyznaczenia współczynników K dla różnych roślin. W IMUZ opracowano takie współczynniki dla użytków zielonych oraz dla kilku roślin uprawnych w rejonie Bydgoszczy (tab. 1). Podobne wielkości K uzyskała Nagawiecka w rejonie Krakowa [6]. Również zespół pracowników AR we Wrocławiu pod kie-

T a b e l a 1

Sezonowe współczynniki $K_1 = \frac{ETR}{ETp}$ Penman roślin nawadnianych

Miesiąc	Dekada	Pszenica ozima	Buraki cukrowe	Jęczmień jary + wsiewka koniczyny	Koniczyna z trawami	Kuku- rydza	łąki 3-kośne
IV	1	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,55
	2	0,55	0,45	0,45	0,50	0,45	0,75
	3	0,65	0,40	0,45	0,55	0,40	0,80
V	1	0,90	0,40	0,55	0,65	0,45	0,90
	2	1,15	0,40	0,75	0,75	0,50	1,10
	3	1,30	0,40	0,95	0,90	0,55	1,30
VI	1	1,40	0,45	1,20	1,00	0,60	0,70
	2	1,45	0,50	1,40	1,00	0,70	0,75
	3	1,45	0,65	1,40	0,65	1,00	1,10
VII	1	1,25	0,75	1,10	0,95	1,25	1,10
	2	1,00	0,95	0,85	1,10	1,45	1,00
	3	0,50	1,05	0,60	1,15	1,45	1,00
VIII	1	0,35	1,15	0,65	1,20	1,45	0,70
	2	0,35	1,15	0,75	1,10	1,45	0,75
	3	0,35	1,15	0,90	0,40	1,45	1,20
IX	1	0,40	1,15	1,05	0,35	1,45	1,25
	2	0,40	1,15	1,05	0,40	1,45	1,30
	3	0,50	1,15	1,05	0,50	1,35	1,30
X	1	0,65	1,15	0,95	0,55	1,10	0,70
	2	0,70	1,15	1,05	0,65	0,60	0,70
	3	0,70	0,70	1,05	0,90	0,60	0,70

rownictwem Baca [1] dysponuje dużym materiałem badawczym, który pozwoli na opracowanie współczynników roślinnych K. Należy przy tym pamiętać, że do nawodnień należy zalecać współczynniki uzyskane z obiektów nawadnianych, na których brak wilgoci w glebie nie powodował hamowania transpiracji.

Ostatnio wiele danych z tego zakresu opracowano w FAO [2, 3]. Dane te mogą być wykorzystane częściowo u nas, po ich zweryfiko-

waniu. Według naszych badań w Bydgoszczy współczynniki K_c według zaleceń FAO należy zwiększyć, jeśli stosujemy wzór Penmana o 23%, gdyż stosunek $\frac{ETp_{FAO}}{ETp_{Penman}} = 1,23$.

Jeśli więc dla pszenicy w pełni rozwoju K_c wynosi 1,05-1,15, to $K_1 = 1,3$ do 1,42. Są to wielkości zbliżone do uzyskanych w Bydgoszczy [13, 14, 15] i w rejonie Krakowa [7].

Przy nawodnieniach dużych obszarów ulegnie zmianie klimat lokalny. Obniży się temperatura i zmaleje niedosyt wilgotności powietrza. Wobec tego należy wprowadzić współczynniki zmniejszające, jeśli korzystamy z danych klimatycznych z okresu przed nawodnieniem lub z obszarów nie nawadnianych.

W okresach nawodnień wzór 5 przyjmuje postać:

$$ETr = K_1 \cdot ETp_{Penman} \cdot m \quad (8)$$

$m = 0,9-0,85$ wg zaleceń FAO [2].

Tak obliczone wielkości ETr są maksymalnymi w warunkach pełnego zaopatrzenia roślin w wodę łatwo dostępną. W okresach korzystania z wody trudno dostępnej następuje ograniczenie transpiracji. Przy braku możliwości nawodnień ewapotranspiracja aktualna będzie niższa od możliwej i wyniesie:

$$ETr = K_1 \cdot ETp_{Penman} \cdot \frac{RUa}{RU - ERU} \quad (9)$$

gdzie:

RUa - retencja użyteczna aktualna w profilu porośniętym korzeniami,

RU - całkowity zapas wody użytecznej,

ERU - retencja użyteczna łatwo dostępna w profilu.

W okresach obniżonej transpiracji wzrost roślin jest hamowany i powoduje obniżenie plonów.

Retencja użyteczna. Jako retencję użyteczną przyjmuje się różnicę między połową pojemnością wodną i zapasem nieużytecznym, odpowiadającym sile ssącej 15 at., tj. $pF = 4,2$:

$$RU = PPW - WTW \quad (10)$$

gdzie:

RU - retencja użyteczna w profilu,

PPW - połowa pojemność wodna,

WTW - wilgotność trwałego wędnięcia.

Mięszość czynnej warstwy glebowej jest zależna od głębokości ukorzenienia roślin. Badania węgierskie zalecają zmieniające się

głębokości od 30 do 100 cm [11]. Niemcy podają, że większość roślin uprawnych w pełni rozwoju posiada głębokość ukorzenia 60 cm na piaskach do 100-120 cm w utworach pyłowych [12]. Zalecenia FAO podają różne głębokości, a mianowicie 0,3-0,5 m dla warzyw, 1,0-1,5 m dla zbóż oraz 1,0-2,0 m dla lucerny [2]. Również polskie badania wykazują, że rośliny korzenia się głęboko, powyżej 100 cm [4, 10]. Wodę łatwo dostępną proponuje się obliczać według wzoru:

$$ERU = p \cdot D \cdot RU \quad (11)$$

T a b e l a 2

Głębokość ukorzenia roślin (w m) na glebach średnich o dobrej strukturze

Miesiąc	Dekada	Pszenica ozima	Jęczmień jary + wsiewka koniczyny	Koniczyna z trawami	Buraki cukrowe
IV	1	0,30	0,10	0,60	-
	2	0,30	0,10	0,60	-
	3	0,30	0,20	0,60	0,10
V	1	0,40	0,30	0,70	0,20
	2	0,50	0,40	0,80	0,30
	3	0,60	0,50	0,80	0,40
VI	1	0,70	0,60	0,80	0,50
	2	0,80	0,70	0,80	0,60
	3	0,90	0,80	0,80	0,70
VII	1	1,00	0,90	0,80	0,80
	2	1,00	0,90	0,80	0,90
	3	1,00	0,90	0,80	1,00
VIII	1	1,00	0,30	0,80	1,00
	2		0,30	0,80	1,00
	3		0,40		1,00
IX	1		0,50		1,00
	2		0,60		1,00
	3	0,10	0,60		1,00
X	1	0,10	0,60		1,00
	2	0,20	0,60		1,00
	3	0,30	0,60		

gdzie:

ERU - woda łatwo dostępna,

RU - całkowity zapas wody użytecznej w profilu 1 m,

D - głębokość ukorzenia,

p - część wody łatwo dostępnej.

Do czasu opracowania polskich danych dotyczących głębokości ukorzenia różnych roślin w poszczególnych fazach rozwojowych proponuje się przyjmować głębokość ukorzenia D w pełni rozwoju według zaleceń FAO [2, 3], a w okresach wcześniejszych przyjmować wzrost korzeni średnio 1 cm/dobę [10, 19]. Przykład takich propozycji podano w tabeli 2.

Część wody łatwo dostępnej wynosi średnio około 50% całkowitej wody użytecznej w warstwie korzeniowej [12]. Według zaleceń FAO wielkości p dla zbóż w pełni rozwoju wynoszą 0,55, a w końcu okresu dojrzewania 0,90. Zależą też one od intensywności transpiracji, a mianowicie przy niskiej są wyższe, a przy wysokiej niższe.

H - Odpływ powierzchniowy i gruntowy. Odpływ gruntowy może nastąpić wtedy, kiedy opady uzupełnią zapasy wody glebowej powyżej polowej pojemności wodnej. Natomiast odpływ powierzchniowy nastąpi w okresach, gdy natężenie opadu jest większe od prędkości wsiąkania lub gleba będzie całkowicie przesycona wodą.

W projektach melioracyjnych proponuje się obliczanie odpływu w okresach dekadowych, kiedy opady przekraczają parowanie i wyczerpanie retencji według następującego wzoru:

$$H = P - \Delta RU - ETr \quad (12)$$

gdzie:

H - odpływ,

P - opad,

ΔRU - wyczerpanie retencji na początku okresu obliczeniowego ($\Delta RU = RU - RUa$).

Obliczenia takie są zgodne z pomiarami w terenie płaskim. Na terenach falistych należy przyjąć współczynnik zwiększający lub obliczyć spływ w czasie ulewnego deszczu z różnicy między natężeniem opadu a prędkością wsiąkania. Zagadnienie to wymaga dalszych badań.

Obliczenia zapotrzebowania wody do nawodnień przy różnym prawdopodobieństwie

Dla ustalenia ilości potrzebnej wody do nawodnień należy ustalić ilości brakującej wody w okresach dekadowych w wieloletniu, następnie zsumować je w okresach miesięcznych i za cały okres wegetacji. Na podstawie zapotrzebowania w poszczególnych okresach oblicza się wielkości niedoborów przy różnym prawdopodobieństwie.

Mając obliczone zapotrzebowanie dla poszczególnych roślin można obliczyć sumę potrzeb dla wszystkich upraw w kolejnych okresach. Na większym obszarze można obliczyć zapotrzebowanie wody jako średnią ważoną, dysponując procentowym udziałem roślin na poszczególnych kompleksach glebowych i ich zapotrzebowaniem na wodę.

ZESTAWIENIE DANYCH WYJŚCIOWYCH DO OBLICZEŃ ZAPOTRZEBOWANIA WODY DO NAWODNIEŃ

I. Dane meteorologiczne z 20-25-lecia dla okresów dekadowych i miesięcznych:

1. P - opady w mm,
2. T - temperatury powietrza w °C,
3. f - wilgotność względem powietrza w %,
4. e - prężność pary wodnej w hPa,
5. d - niedosyt wilgotności powietrza w hPa,
6. S - czas usłonecznienia w godzinach,
7. V - prędkość wiatru w m/s.

II. Dane glebowe i roślinne:

1. Rodzaje gleb, ich powierzchnie,
2. Retencja użyteczna w profilu 1 m - RU w mm,
3. Rodzaje roślin i ich powierzchnie,
4. Współczynniki sezonowe K dla poszczególnych roślin,
5. Część wody łatwo dostępnej - p,
6. Głębokość ukorzenia roślin w poszczególnych okresach - D.

III. Tabele pomocnicze:

1. Radiacja słoneczna na górnej granicy atmosfery,
2. Czas usłonecznienia możliwego w godzinach,
3. Prężność pary wodnej nasyconej w różnych temperaturach.

WNIOSKI

1. Proponowana metoda obliczeń niedoborów wodnych może być stosowana w projektach melioracyjnych, szczególnie dla projektowanych zbiorników retencyjnych i szczegółowych urządzeń nawadniających. Może też być wykorzystana dla celów eksploatacji deszczowni. W tym wypadku należy na bieżąco prowadzić obliczenia bilansowo wodne dla okresów minionych oraz prognozować zużycie na okres następny, korzystając z prognoz meteorologicznych.

2. Podane w opracowaniu poszczególne wzory i współczynniki powinny być w dalszym ciągu udoskonalane. Należy zwrócić uwagę głównie na ujednoczenie metod obliczania ewapotranspiracji potencjalnej oraz uzupełniać sezonowe współczynniki roślinne K, głębokości ukorzenia roślin uprawnych w poszczególnych fazach rozwojowych i rozkład wilgotności krytycznej, odpowiadającej wyczerpaniu wody łatwo dostępnej z profilu.

LITERATURA

1. Bac S.: Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 205, 1978.
2. Doorenbos J., Pruitt W. O.: Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, FAO Rome, 1977.
3. Doorenbos J., Kassan A. H.: Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 31, Rome, 1979.
4. Klimas E., Piasecki I.: Ustalenie wpływu zabiegów agromelioracyjnych na rozwój systemów korzeniowych roślin uprawnych oraz na stopień zachwaszczenia pól. ATR Bydgoszcz, 1979. [Maszynopis tematu zakończony znajduje się w ATR i IMUZ].
5. Matul K., Dworska M.: Pr. Kom. Gosp. Wod. 10, 1972.
6. Nagawiecka H.: Wskaźniki zużycia i potrzeb wodnych w produkcji roślinnej w rejonie Krakowa. Praca habilitacyjna AR Kraków Rozprawy - 1978.
7. Nagawiecka H.: Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. (w druku).
8. Okruszko H., Roguski W., Szuniewicz J., Zawadzki S.: Tymczasowe zasady określania w projektach melioracyjnych zapasów wody użytecznej w glebach hydrogenicznych CBS i PWM. Materiały pomocnicze nr 10, Warszawa 1971.
9. Ostromęcki J.: Rocz. Nauk Rol. Ser. F, 71, 3, 1956.
10. Passela E.: Rozprawy AR Kraków 1975.
11. Posgay E.: Determination of the Dates and Norm of Irrigation, Öntözéses Gazdálkodás. 6, 2, Szarvas 1963, Hungary.
12. Renger M., Voigt H., Strebel O., Giesel W.: 15: 206-221, 1974.
13. Roguski W.: Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 205, 1978.
14. Roguski W., Gabrych K.: Wiad. Inst. Melior. 12, 3, 1975.
15. Roguski W.: Wiad. Melior. 2, 1979.
16. Roguski W.: Niedobory wodne roślin uprawnych i częstotliwość ich występowania w rejonie Kujaw. - Materiały na konferencję naukowo-techniczną pt.: „Problemy nawodnień w Polsce” NOT SITWM Bydgoszcz 3-4 X 1980.

17. Sarnacka S.: Opracowanie metody określania potrzeb wodnych produkcji roślinnej w rolnictwie w oparciu o wyniki dotychczasowych badań krajowych i obcych. IMGW Warszawa 1977. Maszynopis tematu zakończony 7.01.05.04.
18. Slusarczyk E.: Melioracje rolne, 3, 1979.
19. Tournon G., Ravelli T., Allavena L., Merlo C.: Potential evapotranspiration and water deficit in consideration of the use of climatic formulae. International Round Table Conference on „Evapotranspiration” ICID Budapest, 1977, R 3/24.

В. Рогуски

МЕТОД ОЦЕНКИ ДЕФИЦИТА ВОДЫ ДЛЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ В СВЯЗИ С ПРОЕКТИРОВАНИЕМ И ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ИРРИГАЦИОННЫХ ОБОРУДОВАНИЙ

Р е з ю м е

В настоящей статье представлен метод оценки использования воды для орошения культурных растений на основании декадного водного баланса в профилях почвы:

$$W_n = ET_r - P - ER_{Up} \mp ER_{Uk} + H \text{ мм} \quad (4)$$

где:

W_n - потребность воды для орошения

ET_r - действительная эвапотранспирация (актуальная)

P - осадки

ER_{Up} - накопление легко доступной воды в начале периода

ER_{Uk} - эффективная ретенция в конце периода

H - сток воды

Автор предлагает производить оценку действительной эвапотранспирации по формуле Пенмана и по сезонным коэффициентам K :

$$ET_r = K \cdot ET_r \text{ Пенман}. \quad (5)$$

Накопление легко доступной воды (ER_{Up}) изучается по физическо-водным свойствам почвы, по глубине укоренения растений (D) и части легко доступной воды:

$$ER_U = RU \cdot \rho \cdot D. \quad (11)$$

Коэффициенты K , полученные в Быдгощи представлены на таблице 1 а глубина корней растений на таблице 2.

W. Roguski

THE METHOD OF ESTIMATION OF CROP WATER DEFICIT
FOR PROJECTING AND EXPLOITATION OF IRRIGATION
DEVICES

S u m m a r y

The method of estimation of irrigation water requirements of plants is presented using the decade water balance of soil profile:

$$W_n = E_{Tr} - P - ER_{Up} \mp ER_{Uk} + H \text{ mm} \quad (4)$$

where:

W_n - water deficit or irrigation requirements,

E_{Tr} - actual evapotranspiration,

P - precipitation,

ER_{Up} - readily available soil water at the beginning of period,

ER_{Uk} - readily available soil water in the end of period,

H - flow off.

The author proposed to estimate actual evapotranspiration using potential evapotranspiration according to Penman formula and seasonal crop coefficients:

$$E_{Tr} = K_1 \cdot E_{Tp} \text{ Penman.} \quad (5)$$

Readily available soil water (ERU) is estimated on the basis of physical and water properties of soils, rooting depth of plants (D) and fraction available soil water (p):

$$ERU = RU \cdot p \cdot D. \quad (11)$$

The coefficients K , obtained in Bydgoszcz, are presented in Table 1, and rooting depth in Table 2.