

SZACOWANIE WIELKOŚCI PAROWANIA WODY Z POWIERZCHNI DACHOWYCH NA PODSTAWIE WYBRANYCH WZORÓW EMPIRYCZNYCH

Wioletta Żarnowiec, Agnieszka Policht-Latawiec,
Krzysztof Ostrowski

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Celem pracy była ocena możliwości szacowania wielkości parowania wody z powierzchni dachowych na podstawie wybranych wzorów empirycznych opisujących parowanie z wolnej powierzchni wody. Badania przeprowadzono w latach 2011 i 2012, w miesiącach od maja do września, na terenie magazynowego centrum logistycznego w Modlniczce k. Krakowa w stacji doświadczalnej wyposażonej w eksperymentalny dach i automatyczną stację meteorologiczną. Obliczone na podstawie wzorów miesięczne i średnie sezonowe sumy parowania porównano z wynikami pomiarów *in situ*. Określono współczynniki korekcyjne pozwalające na wykorzystanie wzorów do obliczania ewaporacji z powierzchni dachowych. Do szacowania parowania wody z dachów proponuje się wzór Baca, po uwzględnieniu współczynnika przeliczeniowego.

Słowa kluczowe: wody opadowe, system zraszania, współczynniki przeliczeniowe, parametry meteorologiczne

WSTĘP

W literaturze krajowej i zagranicznej zjawisko parowania jest analizowane przede wszystkim jako jeden z głównych procesów w lądowej części cyklu hydrologicznego. Wiele opracowań przedstawia problematykę związaną z parowaniem terenowym i ewapotranspiracją. Parowanie terenowe jest omawiane szeroko w aspekcie przestrzennej i czasowej zmienności oraz jego roli i znaczenia w bilansie wodnym zlewni [Trapp 1993, Jaworski 1997, Jokiel 2007]. Ewapotranspiracja jest rozpatrywana jako ważny

Adres do korespondencji – Corresponding authors: mgr inż. Wioletta Żarnowiec, dr inż. Agnieszka Policht-Latawiec, prof. dr hab. inż. Krzysztof Ostrowski, Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, al. Mickiewicza 24-28, 30-059 Kraków, Poland, e-mail: w.zarnowiec@ur.krakow.pl; a.policht@ur.krakow.pl; k.ostrowski@ur.krakow.pl.

parametr agrometeorologiczny, służący do wyznaczenia klimatycznego bilansu wodnego, wskazującego na potencjalny niedobór lub nadmiar opadu – istotny czynnik w ocenie potrzeb nawadniania czy w określaniu suszy rolniczej [Jaworski 2004, Kołodziej 2008, Kuźniar 2010, Doroszewski i in. 2012, Łabędzki i in. 2012, Rojek i in. 2014, Szajda i Łabędzki 2016, Vicente-Serrano i in. 2015, Ziernicka-Wojtaszek 2015, Ziernicka-Wojtaszek i in. 2015]. Parowanie wody rozprowadzanej za pośrednictwem systemu zraszania z powierzchni płaskiego dachu przemysłowego, jest w znikomym stopniu przedmiotem zainteresowań badaczy. Przesłanką do podjęcia badań zjawiska ewaporacji w tak specyficznych warunkach była konieczność zagospodarowania wód spływających z uszczelnionych powierzchni zanieczyszczonych (tereny przemysłowe, obiekty magazynowania, place składowe, parkingi) w miejscu ich powstawania. Spośród składników parowania terenowego parowanie z wolnej powierzchni wody (ewaporacja) jest najbardziej porównywalne z parowaniem wody z powierzchni dachów. Czynnikiem determinującym powyższe przyporządkowanie są: rodzaj powierzchni, z której odbywa się parowanie, i warunki, od których zależy dany rodzaj parowania. Jaworski [2004] podaje, że na proces parowania z powierzchni wody, jak i innych powierzchni zwilżonych wpływają takie same czynniki – fizyczne i środowiskowe.

Potrzeby praktyki inżynierskiej doprowadziły do powstania bardzo dużej liczby formuł empirycznych, które pozwalają na ilościową ocenę parowania z powierzchni wody w sposób pośredni [Grabarczyk i in. 1990, Sasik 1992, Kossowska-Cezak i in. 2000, Kossowska-Cezak i Bajkiewicz-Grabowska 2008, Prządka 2009, Granger i Hedstrom 2011]. Niektórzy autorzy przyjmują, że wielkość parowania z powierzchni wody można scharakteryzować za pomocą, tzw. wskaźnika parowania E_w lub parowania wskaźnikowego, wyznaczanego na podstawie wzorów empirycznych opracowanych z wykorzystaniem danych pomiarowych z ewaporometru lądowego (ewaporometr Wilda). Do takich wzorów zalicza się między innymi formułę Schmucka i wzór Baca [Bac i in. 1998, Jaworski 2004]. Przy założeniu, że w warunkach naturalnych maksymalne ciśnienie pary wodnej w temperaturze powierzchni parującej zbliżone jest do maksymalnego ciśnienia pary wodnej w temperaturze przyległego powietrza, niedosyt wilgotności powietrza może być miarą zdolności parowania z powierzchni wody [Kossowska-Cezak i in. 2000]. Przykładami takich wzorów są: skrócona formuła Penmana, wzór Dawidowa, Zajkova, Tichomirowa oraz wzór Iwanowa [Kossakowska-Cezak i Bajkiewicz-Grabowska 2008, Sasik 1992]. Wzory te uzależniają parowanie od ogólnie dostępnych danych meteorologicznych, jednak żaden z nich nie opisuje parowania wody z powierzchni dachowych. Nie uwzględniają one bowiem warunków sztucznego rozpylania wody (zraszania) oraz jej ruchu po powierzchni dachu (spływu cienkiej warstwy wody). Z tego powodu, w aspekcie poznawczym, istnieje potrzeba weryfikacji wzorów na parowanie z wolnej powierzchni wody do obliczania parowania z dachów płaskich w warunkach ich sztucznego zraszania w oparciu o materiał empiryczny pochodzący z pomiarów bezpośrednich.

Celem pracy była ocena możliwości szacowania wielkości parowania wody z powierzchni dachowych na podstawie wybranych wzorów empirycznych.

MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzono w latach 2011 i 2012 w miesiącach od maja do września w stacji doświadczalnej na terenie magazynowego centrum logistycznego w Modlniczce k. Krakowa. W skład stacji wchodziły: dach eksperymentalny pokryty membraną PCV, zbiornik gromadzący wodę do systemu zraszania, automatyczna stacja meteorologiczna oraz tworząca obieg zamknięty instalacja doprowadzająca, rozprowadzająca (mikrozraszacze) i odprowadzająca wodę z dachu wraz z urządzeniami elektronicznymi do ciągłego pomiaru i rejestracji danych. Szczegółowy opis stacji badawczej został przedstawiony w pracy Żarnowiec [2015], w której analizowano wartości i zmienność ewaporacji wody z dachu eksperymentalnego na tle warunków meteorologicznych z podziałem na parowanie w porze dziennej i nocnej, w przedziałach miesięcznych i w całym okresie badań.

Zasadniczą bazę danych analizowanych w pracy stanowiły, ustalone na podstawie pomiarów, miesięczne sumy parowania wody z powierzchni dachu eksperymentalnego oraz wartości parametrów meteorologicznych pomierzonych na stacji doświadczalnej. Dla osiągnięcia założonego celu pracy wykorzystano średnie miesięczne wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza, prędkości wiatru oraz miesięczne natężenia promieniowania całkowitego. Ponadto, do danych analizowanych w pracy dołączono, określane w sposób pośredni, średnie miesięczne niedosyty wilgotności powietrza. W okresie badań, warunki termiczne zanotowane na stacji doświadczalnej, na tle średnich z trzydziestolecia 1971–2000 charakteryzowały się, poza nielicznymi wyjątkami, wyższymi średnimi miesięcznymi temperaturami powietrza. Średnie miesięczne temperatury powietrza, niższe od normy wieloletniej, zanotowano tylko w miesiącach: lipcu 2011 roku oraz czerwcu 2012 roku. Miesięczne nasłonecznienie przyjmowało wartości z przedziału $34,8 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \div 164,9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, przy czym największe zanotowano w maju, a najmniejsze we wrześniu 2012 roku. Miesięczne nasłonecznienie wyższe od normy wieloletniej zanotowano w 7 miesiącach. Pozostałe, na tle wielolecia, charakteryzowały się niższymi sumami całkowitego natężenia promieniowania słonecznego. Największe odchylenie sumy miesięcznej od średniej z wielolecia zanotowano w kwietniu 2012 roku oraz lipcu 2011 roku. W kwietniu nasłonecznienie przekroczyło średnią z wielolecia o $15,8 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, natomiast w lipcu było od niej mniejsze o $39,4 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$. W okresie badań średnie miesięczne wilgotności względne powietrza nie wykazywały znacznego zróżnicowania. Największą średnią miesięczną wilgotność zanotowano w lipcu 2011 roku (87%) natomiast najmniejszą w maju 2012 roku (70,5%). Na tle średnich z wielolecia, średnie miesięczne wartości wilgotności względnej powietrza zanotowane na stacji doświadczalnej charakteryzowały się, poza trzema wyjątkami, wyższymi wartościami. Niższe wartości zanotowano tylko w kwietniu i wrześniu 2011 roku oraz w maju 2012 roku. Największe odchylenie od średniej z wielolecia zanotowano w lipcu 2011 roku (wartości większe o 9,3%) oraz w maju 2012 roku (mniejsze o 2,6%). W okresie badań średnie miesięczne prędkości wiatru osiągały wartości $2,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \div 3,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Najmniejszą wartość zanotowano w sierpniu 2011 roku, a największą w lipcu 2011 roku.

Dla lat 2011 i 2012 obliczono miesięczne sumy parowania z wolnego zwierciadła wody siedmioma wzorami empirycznymi, często stosowanymi w praktyce inżynierskiej, przedstawiającymi wielkość parowania jako funkcję jednego lub dwóch czynników meteorologicznych. Uwzględniono wzory, które determinują wielkość parowania w zależności od:

- temperatury i wilgotności względnej powietrza (wzór Iwanowa),
- prędkości wiatru i nasłonecznienia (wzór Baca),
- niedosytu wilgotności powietrza i prędkości wiatru (wzór Zajkova, Dawidowa, Tichomirowa, skrócona formuła Penmana),
- niedosytu wilgotności powietrza (wzór Schmucka) (tab. 1).

Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów *in situ* parowania z powierzchni dachu dla poszczególnych miesięcy okresu badawczego 2011–2012 oraz okresów pomiarowych (maj–wrzesień) w poszczególnych latach.

Tabela 1. Wybrane wzory empiryczne do szacowania parowania z powierzchni wody [Bac i in. 1998, Jaworski 2004, Kossakowska-Cezak i Bajkiewicz-Grabowska 2008, Prządka 2009, Sasik 1992]

Table 1. Selected empirical formulas for estimating evaporation from water surface [Bac et al. 1998, Jaworski 2004, Kossakowska-Cezak and Bajkiewicz-Grabowska 2008, Prządka 2009, Sasik 1992]

Autor – Author	Wzór – Formula
Zajkow	$E_o = 0,14 \cdot n \cdot d \cdot (1 + 0,72 \cdot v)$
Dawidow	$E_o = 15 \cdot d^{0,8} \cdot (1 + 0,125 \cdot v)$
Tichomirow	$E_o = d \cdot (15 + 3 \cdot v)$
Penman	$E_o = 0,36 \cdot n \cdot d \cdot (1 + 0,5 \cdot v)$
Iwanow	$E_o = 0,0018 \cdot (25 + t)^2 \cdot (100 - f)$
Bac	$E_w = 3 \cdot d_0 \cdot \sqrt{v} + 0,344 \cdot S$
Schmuck	$E_w = 30 \cdot d$

E_o – miesięczna suma parowania z powierzchni wody – the monthly sum of evaporation from water Surface, mm; E_w – miesięczna wielkość parowania wskaźnikowego – the monthly amount of reference evaporation, mm; n – liczba dni w miesiącu – number of days in a month; d – średni miesięczny niedosyt wilgotności powietrza – the average monthly humidity saturation deficit, mm Hg; d_0 – średni miesięczny niedosyt wilgotności powietrza – the average monthly humidity saturation deficit, hPa; v – średnia miesięczna prędkość wiatru – the average monthly wind speed, $m \cdot s^{-1}$; t – średnia miesięczna temperatura powietrza – the average monthly air temperature, °C; f – średnia miesięczna wilgotność względna powietrza – the average monthly relative air humidity, %; S – miesięczna suma promieniowania całkowitego – the average monthly intensity of global radiation, $kWh \cdot m^{-2}$.

Miesięczne sumy parowania obliczone wzorami uzależniającymi wielkość parowania od tych samych parametrów meteorologicznych (formuły Zajkova, Dawidowa, Tichomirowa i Penmana) porównano z miesięcznymi sumami parowania wody z powierzchni dachu. Do dalszych rozważań przyjęto, obliczone jedną z powyższych czterech formuł, wartości najbardziej zbliżone do wartości pomierzonego parowania z powierzchni dachu oraz wartości uzyskane ze wzorów Iwanowa, Baca i Schmucka. Ustalono średnie dla okresu od maja do września z lat 2011–2012 miesięczne sumy parowania obliczone tymi wzorami i średnie miesięczne z obu wymienionych lat sumy parowania wody z powierzchni dachu.

Ilorazy pomierzonych sum parowania wody z dachu i obliczonych za pomocą powyższych formuł pozwoliły na ustalenie współczynników przeliczeniowych (redukcyjnych),

umożliwiających wykorzystywanie analizowanych wzorów do szacowania ewaporacji z powierzchni dachu. Obliczono współczynniki dla poszczególnych miesięcy (w_m) oraz współczynniki średnie za okres od maja do września (w_2). Porównano otrzymane wartości przed i po uwzględnieniu współczynników przejścia z pomierzonymi wartościami parowania z dachu eksperymentalnego.

WYNIKI BADAŃ

Sumy parowania obliczone wszystkimi wzorami były niższe od sum pomierzonych w każdym miesiącu i okresie badań (tab. 1, ryc. 1). Najniższe wartości parowania otrzymano z formuły Zajkova (tab. 1, ryc. 1). Przyjmując, że pomierzone sumy parowania wody z dachu w poszczególnych miesiącach stanowiły 100%, to wartości obliczone formułą Zajkova były od nich niższe od 60,9% w maju 2012 roku do 81,8% we wrześniu 2012 roku (ryc. 2). Parowanie za okres od maja do września osiągnęło wartości niższe od pomierzonych o 612 mm (71,3%) w 2011 roku i o 706 mm (71,5%) w 2012 roku (ryc. 1). Parowanie obliczone wzorami Dawidowa, Iwanowa oraz Baca było również znacznie mniejsze od pomierzonego (tab. 2, ryc. 1). Okresowa suma parowania obliczona według wzoru Dawidowa była mniejsza od pomierzonej o 563 mm (65,6%) w 2011 roku i o 661 mm (66,9%) w 2012 roku, a wynikająca z formuły Iwanowa o 532 mm (62,0%) w 2011 roku i o 630 mm (63,8%) w 2012 roku, natomiast ze wzoru Baca o 504 mm (58,7%) w 2011 roku i o 609 mm (61,6%) w 2012 roku (ryc. 1). Sumy parowania obliczone powyższymi czterema wzorami w każdym miesiącu okresu badawczego, poza jednym wyjątkiem, nie stanowiły więcej niż 50% miesięcznych sum parowania wody z powierzchni dachu ustalonych na podstawie pomiarów bezpośrednich. Wyjątek stanowiła wartość obliczona wzorem Baca dla sierpnia 2011 roku (51,3%) (ryc. 2).

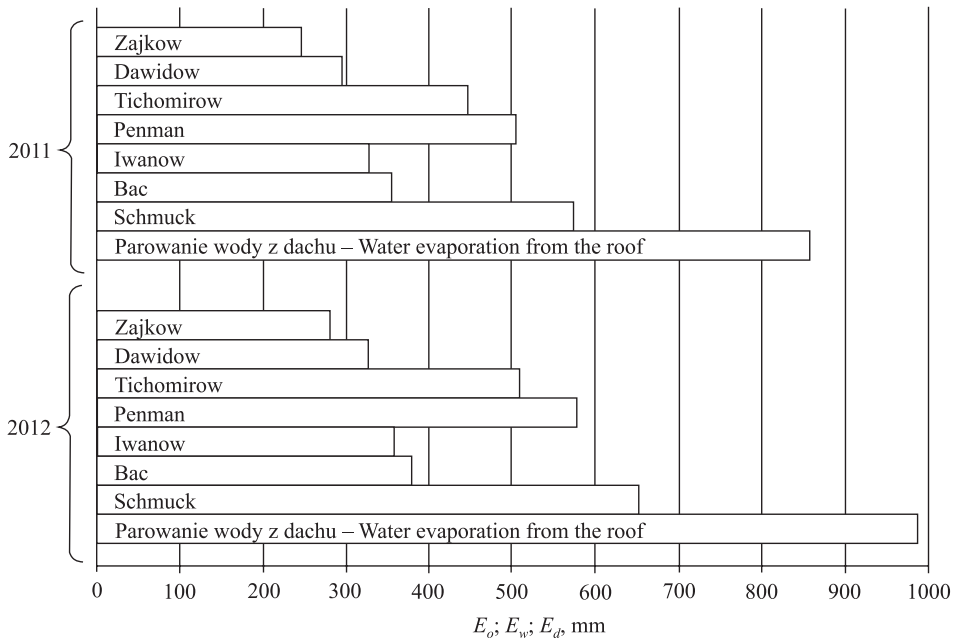
Tabela 2. Miesięczne sumy parowania wody z dachu eksperymentalnego w okresie 2011–2012 na tle miesięcznych sum parowania obliczonych wzorami empirycznymi

Table 2. The monthly sum of water evaporation from the experimental roof in the period 2011–2012 and monthly sum of evaporation calculated empirical

Autor – Author	2011					2012				
	Miesiąc – Month									
	V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX
Zajkow	52	60	43	52	39	72	51	67	58	34
Dawidow	62	69	50	63	51	76	61	75	69	46
Tichomirow	95	109	73	96	73	123	93	119	108	65
Penman	107	123	87	108	80	145	104	137	120	71
Iwanow	71	81	49	71	54	87	65	82	76	48
Bac	82	79	61	77	55	92	77	88	74	48
Schmuck	125	136	88	127	97	150	116	152	146	87
Parowanie wody z powierzchni dachu Water evaporation from the roof surface	179	219	168	144	148	184	189	207	221	187

Wartości miesięcznych sum parowania obliczone wzorami Tichomirowa, Penmana oraz Schmucka stanowiły w większości przypadków więcej niż 50% wartości pomierzonych. Najmniejsze różnice pomiędzy wartościami obliczonymi a zmierzonymi stwierdzono w przypadku wzoru Schmucka, zaś największe w przypadku wzoru Tichomirowa (ryc. 2).

Miesięczne sumy parowania obliczone wzorem Schmucka były mniejsze od pomierzonych od 53,5% (wrzesień 2012) do 11,8% (sierpień 2011) (ryc. 2), a sumy za okres od maja do września o 285 mm (33,2%) w 2011 roku i o 337 mm (34,1%) w 2012 roku (ryc. 1). Wartości sum parowania miesięcznego, obliczone według formuły Tichomirowa, były mniejsze od 65,2% (wrzesień 2012) do 33,2% (maj 2012) (ryc. 2), a sumy okresowe o 412 mm (48,0%) w 2011 roku i 480 mm (48,6%) w 2012 roku (ryc. 1).

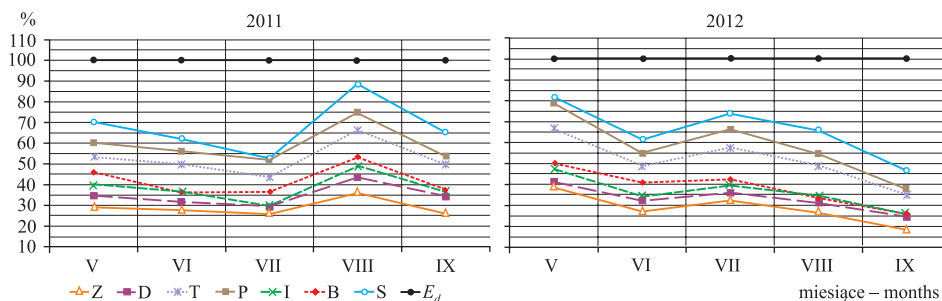


Ryc. 1. Sumy parowania wody z dachu oraz sumy obliczone wzorami różnych autorów w okresie V–IX w latach 2011 i 2012

Fig. 1. The sums of water evaporation from the roof and the sum calculated formulas of different authors in the period V–IX in 2011 and 2012

Miesięczne sumy parowania obliczone według wzoru Schmucka były mniejsze od pomierzonych od 53,5% (wrzesień 2012) do 11,8% (sierpień 2011) (ryc. 2), a sumy za okres od września do maja o 285 mm (33,2%) w 2011 roku i o 337 mm (34,1%) w 2012 roku (ryc. 1). Wartości sum parowania miesięcznego, obliczone według formuły Tichomirowa, były mniejsze od 65,2% (wrzesień 2012) do 33,2% (maj 2012) (ryc. 2), a sumy okresowe o 412 mm (48,0%) w 2011 roku i 480 mm (48,6%) w 2012 roku (ryc. 1). Miesięczne sumy parowania obliczone skróconą formułą Penmana zawierały się w przedziale pomiędzy wartościami obliczonymi wzorami Schmucka a Tichomirowa

(tab. 1, ryc. 2). Sumy obliczone za pomocą tej formuły były mniejsze od wartości pomierzonych od 62,0% we wrześniu do 21,2% w maju 2012 roku (ryc. 2), a okresowe o 353 mm (41,1%) w 2011 roku i 411 mm (41,6%) w 2012 roku (ryc. 1).



Ryc. 2. Porównanie procentowego udziału miesięcznych sum parowania wody obliczonych wybranymi wzorami empirycznymi: Zajkowa (Z), Dawidowa (D), Tichomirowa (T), Penmana (P), Iwanowa (I), Baca (B) oraz Schmucka (S) w stosunku do miesięcznych wartości sum parowania pomierzonego (E_d) w latach 2011 i 2012

Fig. 2. Comparison of percentage of monthly sum of evaporation calculated using empirical formulas: Zajkow (Z), Dawidow (D), Tichomirow (T), Penman (P), Iwanow (I), Bac (B) and Schmuck (S) relative to monthly sum measured (E_d) in 2011 and 2012

Do dalszych rozważań, spośród wzorów, które uzależniają wartość parowania od dwóch parametrów meteorologicznych – niedosytu wilgotności powietrza i prędkości wiatru (Zajkowa, Dawidowa, Tichomirowa, skrócona formuła Penmana) (tab. 1, ryc. 2), wybrano wzór Penmana, ponieważ miesięczne sumy parowania obliczone tą formułą były najbardziej zbliżone do sum parowania z powierzchni dachu ustalonych na podstawie pomiarów.

Średnie miesięczne sumy parowania z lat 2011–2012 obliczone wzorami Penmana, Iwanowa, Baca i Schmucka były niższe od średnich pomierzonych za te lata (tab. 3). Największe wartości obliczone powyższymi wzorami stwierdzono w maju (79–138 mm), a największą sumę średnią z pomierzonych – 204 mm, odnotowano w czerwcu. Natomiast najniższe wartości zarówno obliczone wzorami (51–92 mm), jak i pomierzone (168 mm) stwierdzono we wrześniu (tab. 3).

Miesięczne i okresowe sumy parowania obliczone wzorami Schmucka i Penmana były bliższe wartościom parowania wody z dachu, niż obliczone wzorami Baca i Iwanowa (tab. 3). Wartości obliczone wzorami Schmucka, Penmana, Baca i Iwanowa za okres od maja do września były niższe od pomierzonych o 313 mm (33,8%), 384 mm (41,5%), 558 mm (60,3%) i 582 mm (62,9%). Różnice pomiędzy miesięcznymi wartościami pomierzonymi, a obliczonymi wzorem Schmucka były najmniejsze i wyniosły średnio 63 mm, przy wahaniach 44 mm (maj) ÷ 78 mm (czerwiec) (tab. 3).

Miesięczne i okresowe sumy parowania obliczone wzorami Schmucka i Penmana były bliższe wartościom parowania wody z dachu, niż obliczone wzorami Baca i Iwanowa (tab. 3). Wartości obliczone wzorami Schmucka, Penmana, Baca i Iwanowa za okres od maja do września były niższe od pomierzonych o 313 mm (33,8%), 384 mm (41,5%), 558 mm (60,3%) i 582 mm (62,9%). Różnice pomiędzy miesięcznymi wartościami

pomierzonymi a obliczonymi według wzoru Schmucka były najmniejsze i wyniosły średnio 63 mm, przy wahaniach 44 mm (maj) ÷ 78 mm (czerwiec) (tab. 3). Wartości miesięczne obliczone formułą Penmana były średnio niższe o 77 mm, przy wahaniach w przedziale 56 mm (maj) ÷ 93 mm (wrzesień) (tab. 3). Średnie różnice pomiędzy wartościami obliczonymi wzorami Baca i Iwanowa a wartościami pomierzonymi były zbliżone i kształtowały się odpowiednio na poziomie 112 mm i 116 mm, przy czym najmniejsze różnice wystąpiły w maju (95 mm i 103 mm), a największe w czerwcu (126 mm i 131 mm) (tab. 3).

Tabela 3. Średnie miesięczne sumy parowania (mm) obliczone wybranymi wzorami empirycznymi oraz średnie miesięczne pomierzone sumy parowania z dachu eksperymentalnego dla okresu V–IX z lat 2011–2012

Table 3. Average monthly sum of evaporation (mm) calculated using selected empirical formulas and sum measured at the experimental roof during the period V–IX in 2011–2012

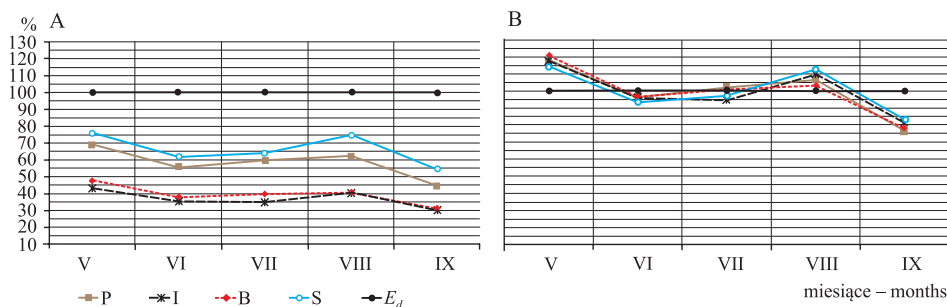
Autor – Author	Miesiąc – Month					Σ V–IX
	V	VI	VII	VIII	IX	
Penman	126	114	112	114	75	541
Iwanow	79	73	66	74	51	343
Bac	87	78	75	75	52	367
Schmuck	138	126	120	136	92	612
Parowanie wody z powierzchni dachu Water evaporation from the roof surface	182	204	188	183	168	925

Przyjmując, że średnie miesięczne sumy parowania wody z dachu z lat 2011–2012 stanowiły 100%, to średnie sumy obliczone za pomocą formuły Schmucka były niższe od wartości pomierzonych od 45,2% (wrzesień) do 24,2% (maj), a ze wzoru Penmana od 55,4% (wrzesień) do 30,8% (maj) (ryc. 3A). Średnie miesięczne sumy parowania obliczone ze wzorów – Baca i Iwanowa, były niższe od średnich sum parowania wody z dachu o więcej niż 50%, przy wahaniach 52,2% ÷ 69,0% (Bac) i 56,6% ÷ 69,6% (Iwanow) w maju i wrześniu (ryc. 3A).

Obliczone współczynniki były zmienne w poszczególnych miesiącach, przyjmując wartości z przedziału od 1,32 do 3,29, a okresowe od 1,51 do 2,70 (tab. 4). Przy założeniu, że średnie sumy parowania wody z dachu w poszczególnych miesiącach stanowiły 100%, to obliczone sumy parowania wody wszystkimi czterema wzorami z uwzględnieniem współczynników w_z , były wyższe w maju i sierpniu, niższe w czerwcu i wrześniu od wartości pomierzonych. W lipcu przyjmowały wartości wyższe jak i niższe od sum parowania wody z dachu, w zależności od rodzaju wykorzystanego wzoru (ryc. 3B).

Z formuły Schmucka otrzymano wartości wyższe od pomierzonych o 14,6% w maju oraz o 12,3% w sierpniu, a niższe o 3,5% w lipcu, 6,6% w czerwcu i 17,2% we wrześniu (ryc. 3B). Podobnie ze wzoru Iwanowa dwie wartości były wyższe od pomierzonych –

o 17,1% (maj) i 9,1% (sierpień), a trzy niższe – o 3,5% (czerwiec), 5,3% (lipiec) i 18,1% (wrzesień) (ryc. 22B). Z formuły Penmana trzy wartości były wyższe od pomierzonych – o 18,4% w maju, 1,9% w lipcu i 6,5% w sierpniu, a dwie niższe – o 4,5% w czerwcu i o 23,7% we wrześniu (ryc. 3B). Według formuły Baca otrzymano wartości wyższe od pomierzonych o 20,5% w maju, o 0,5% w lipcu i 3,3% w sierpniu, a niższe o 3,6% w czerwcu i 22,0% we wrześniu (ryc. 3B).



Ryc. 3. Porównanie procentowego udziału przeciętnych miesięcznych sum parowania obliczonych wybranymi wzorami empirycznymi: Penmana (P), Iwanowa (I), Baca (B) oraz Schmucka (S) przed (A) i po uwzględnieniu współczynników przejścia w_z (B) w stosunku do wartości średnich pomierzonych (E_d) w latach 2011 oraz 2012

Fig. 3. Comparison of percentage of average monthly sum of evaporation calculated using empirical formulas: Penman (P), Iwanow (I), Bac (B) and Schmuck (S) before (A) and after applying the conversion coefficient (w_z) relative to mean values measured (E_d) in 2011 and 2012

Tabela. 4. Współczynniki przejścia dla wzorów empirycznych dla poszczególnych miesięcy (w_m) oraz średnie współczynniki dla okresu V–IX (w_z)

Table 4. Conversion coefficient for empirical formulas for each month (w_m) and average coefficient for the period V–IX (w_z)

Autor – Author	w_m					w_z
	Miesiąc – Month					
	V	VI	VII	VIII	IX	
Penman	1,44	1,79	1,68	1,61	2,24	1,71
Iwanow	2,30	2,79	2,85	2,47	3,29	2,70
Bac	2,09	2,62	2,51	2,44	3,23	2,52
Schmuck	1,32	1,62	1,57	1,35	1,83	1,51

Po uwzględnieniu odpowiedniego współczynnika przejścia w_z (tab. 4) obliczona suma parowania wody za okres od maja do września wzorami Penmana, Schmucka oraz Iwanowa różniła się od sumy parowania z dachu eksperymentalnego w tym okresie o około 2,1%. Różnica pomiędzy sumą obliczoną formułą Baca ($w_z = 2,52$), a sumą z pomiarów była najmniejsza i wyniosła około 1,9 %.

WNIOSKI

Na podstawie analizy danych uzyskanych z badań nad parowaniem wody z dachu budynku przemysłowego można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Miesięczne sumy parowania wody ustalone na podstawie dostępnych w praktyce inżynierskiej formuł empirycznych (Zajkowa, Dawidowa, Tichomirowa, Penmana, Iwanowa, Baca oraz Schmucka), były niższe od wartości uzyskanych z bezpośrednich pomiarów parowania wody z powierzchni dachu. Zastosowanie w praktyce powyższych formuł wymaga wprowadzenia odpowiednich współczynników przeliczeniowych.
2. Ustalone współczynniki przeliczeniowe umożliwiają wykorzystywanie wzorów Penmana, Iwanowa, Baca oraz Schmucka, bazujących na ogólnie dostępnych danych meteorologicznych, do szacowania wartości średnich parowania wody z powierzchni dachów w poszczególnych miesiącach oraz wartości średnich w okresach od maja do września pod warunkiem zastosowania podobnych rozwiązań konstrukcyjnych dachów i systemu zraszania. Ze względu na stosunkowo krótki okres badań określone w niniejszej pracy wartości współczynników przeliczeniowych należy traktować jako orientacyjne.
3. Do szacowania ewaporacji z dachów proponuje się wzór Baca, po uwzględnieniu współczynnika przeliczeniowego. Różnica pomiędzy sumą parowania wody za okres od maja do września obliczonego tym wzorem a wartością zmierzoną była najmniejsza.
4. Analizowane formuły empiryczne uzupełnione o obliczone współczynniki przeliczeniowe mogą stanowić cenne narzędzie wstępnej analizy możliwości odparowywania wód opadowych na dachach przy braku innych możliwości ich zagospodarowania.

PIŚMIENNICTWO

- Bac, S., Koźmiński, Cz., Rojek, M. (1998). Para wodna w atmosferze. [W:] Agrometeorologia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 77–93.
- Doroszewski, A., Jadczyzyn, J., Kozyra, J., Pudełko, R., Stuczyński, T., Mizak, K., Łopatka, A., Koza, P., Górski, T., Wróblewska, E. (2012). Podstawy systemu monitoringu suszy rolniczej. Woda Środ. Obsz. Wiej., 12, 2(38), 77–91.
- Grabarczyk, S., Żarski, J., Dudek, S. (1990). Porównanie ewapotranspiracji potencjalnej obliczonej różnymi formułami z połowym zużyciem wody. Zesz. Nauk. AR Wrocl., ser. Melioracja, XXXV, 191, 23–29.
- Granger, R.J., Hedstrom, N. (2011). Modelling hourly rates of evaporation from small lakes. Hydrology and Earth System Sciences, no.15, 267–277.
- Jaworski, J. (1997). Porównanie modeli parowania terenowego w projekcie badawczym WMO. Cz. II: Weryfikacja modeli parowania terenowego. Wiad. IMGW, 20(2), 33–56.
- Jaworski, J. (2004). Parowanie w cyklu hydrologicznym zlewni rzecznych. Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Warszawa, ss. 422.
- Jokiel, P. (2007). Zmiany, zmienność i ekstremalne sumy parowania terenowego i ewapotranspiracji potencjalnej w Łodzi w drugiej połowie XX wieku. Acta Univer. Lodz., Folia Geographica Physica, 8, 63–88.
- Kołodziej, J. (2008). Kształtowanie się klimatycznego bilansu wodnego na terenie Polski w latach 1981–2000. Infrastr. Ekol. Ter. Wiej., 5, 85–97.

- Kossowska-Cezak, U., Martyn, D., Olszewski, K., Kopacz-Lembowicz, M. (2000). Meteorologia i klimatologia. Pomiary, obserwacje, opracowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Łódź, ss. 260.
- Kossowska-Cezak, U., Bajkiewicz-Grabowska, E. (2008). Parowanie. [W:] Podstawy hydrometeorologii. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 153–192.
- Kuźniar, A. (2010). Rozkład przestrzenny rolniczo-klimatycznego bilansu wodnego w dorzeczu górnej Wisły wyznaczonego z zastosowaniem metody Penmana–Monteitha (FAO-56). Woda Środ. Obsz. Wiej., Rozprawy Naukowe i Monografie, 28, ss. 103.
- Łabędzki, L., Bąk, B., Kanecka-Geszke, E. (2012). Wielkość i zmienność ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana–Monteitha w okresie wegetacyjnym w latach 1970–2004 w wybranych rejonach Polski. Woda Środ. Obsz. Wiej., 12, 2(38), 159–170.
- Prządka, Z. (2009). Porównanie wyników oceny parowania jeziora Łęka uzyskanych metodą obliczeniową i pomiarową. Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Monit. Środ. Przyr., 10, 73–78.
- Rojek, M., Musiał, E., Gąsiorek, E. (2014). Porównanie wskaźników: standaryzowanego opadu (SPI), standaryzowanej ewapotranspiracji wskaźnikowej (SEI) oraz standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SKBW). Inż. Ekol., 3, 155–165.
- Sasik, J. (1992). Parowanie ze stawu rybnego. Zesz. Nauk. AR Wrocław, Rozprawa Habilitacyjna, 107, ss. 57.
- Szajda, J., Łabędzki, L. (2016). Wyznaczanie ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych na podstawie ewapotranspiracji maksymalnej i potencjału wody w glebie. Woda Środ. Obsz. Wiej., 16, 1(53), 71–92.
- Trapp, J. (1993). Geograficzne uwarunkowania atmosferycznej fazy pionowej wymiany wody na Żuławach Wiślanych. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- Vicente-Serrano, S.M., Van der Schrier, G., Beguería, S., Azorin-Molina, C., Lopez-Moreno, J.I. (2015). Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. J. Hydrol., 526, 42–54.
- Ziernicka-Wojtaszek, A. (2015). Klimatyczny bilans wodny na obszarze Polski w świetle współczesnych zmian klimatu. Woda Środ. Obsz. Wiej., 15, 4(52), 93–100.
- Ziernicka-Wojtaszek, A., Zuśka, Z., Piskulak, P. (2015). Potrzeby opadowe roślin uprawnych w aspekcie współczesnych zmian klimatu. Infrastr. Ekol. Ter. Wiej., III(1), 507–514.
- Żarnowiec, W. (2015). The evaporation of water from a sprinkled roof of an industrial building. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 14(2), 243–251.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF ESTIMATING WATER EVAPORATION FROM THE ROOF SURFACES ON THE BASIS OF SELECTED EMPIRICAL FORMULAS

Abstract. The aim of the paper was assessment the possibility of estimating the water evaporation from the roof surfaces on the basis of selected seven empirical formulas for estimating evaporation from water surface. The investigations were conducted from May to September 2011 and 2012 in the storage logistic centre area situated in Modlniczka near Krakow, at the experimental station composed of experimental roof and the automatic meteorological station. Monthly evaporation sum have been calculated using seven different formulas. Given results were compared with measured data. Monthly sum of evaporation calculated using the empirical formulas were lower than values measured. The average monthly sum of evaporation for period have been calculated using equations created by Penman, Iwanow, Schmuck and Bac. Conversion factors for this formulas have been

calculated, allowing to use the formulas to estimate water evaporation from roof surface. To estimate the water evaporation from the roof surface Bac formula with calculated conversion factor is suggested.

Key words: rainwater, sprinkler system, conversion factors, meteorological parameters

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 29.11.2016

Do cytowań – For citation: Żarnowiec, W., Policht-Latawiec, A., Ostrowski, K. (2016). Szacowanie wielkości parowania wody z powierzchni dachowych na podstawie wybranych wzorów empirycznych. Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 15(4), 17–28.