

Halina Hotłoś

Analiza wpływu czynników meteorologicznych na zmienność poboru wody w miejskim systemie wodociągowym

Podstawą do optymalnego projektowania, rozbudowy i modernizacji, a także właściwej eksploatacji i sterowania pracą każdego systemu wodociągowego jest jak najlepsza znajomość zmienności poboru wody oraz możliwości jego prognozowania. Do prognozowania rocznego czy dobowego poboru wody w czasie stosowane są różne metody, m.in. oparte na [1–6]:

- statystycznej ekstrapolacji trendu czasowego wielkości poboru wody (analiza szeregów czasowych),
- korelacji między poborem wody a czynnikami wpływającymi na jego wielkość (metody korelacyjne),
- jednostkowych wskaźnikach poboru wody (metody wskaźnikowe).

Na zmienność ogólnego poboru i zużycia wody przez jej użytkowników w miejskich systemach wodociągowych wpływają różne czynniki. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- czynniki demograficzne (liczba ludności korzystająca z wodociągu, ruchy ludnościowe),
- charakter i funkcja miasta (np. administracyjne, przemysłowe, uzdrowiskowe, rolnicze),
- standard wyposażenia sanitarnego mieszkań,
- tryb życia i pracy oraz nawyki mieszkańców, organizacja wypoczynku w sezonie urlopowym i dniach świątecznych,
- wysokość i zmiany ciśnienia wody w systemie wodociągowym,
- czynniki meteorologiczne (temperatura i wilgotność powietrza, ciśnienie, wysokość opadów deszczu).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy zmian poboru wody we Wrocławiu w 2011 r. w oparciu o materiały eksploatacyjne uzyskane z MPWiK SA we Wrocławiu [7], z uwzględnieniem warunków meteorologicznych [8].

Stan wiedzy

Badania i analizy wpływu czynników meteorologicznych na kształtowanie się poboru wody prowadzone są w Polsce i innych krajach o różnych warunkach klimatycznych, dzięki czemu zależności te są dosyć dobrze rozpoznane. Mimo to badania tego typu powinny być prowadzone oddzielnie w każdym systemie wodociągowym, ze

względu na odmienną specyfikę zależną m.in. od wielkości i charakteru miasta oraz zróżnicowanych warunków lokalnych, w tym meteorologicznych.

Czynnikiem meteorologicznym wpływającym w największym stopniu na dobowy pobór wody jest temperatura powietrza (średnia lub maksymalna w czasie doby). Z wielu badań wynika, że istotny wpływ temperatury powietrza na pobór wody występuje w okresie wiosenno-letnim i w warunkach, gdy temperatura powietrza przekracza wartość graniczną, zależną od lokalnych warunków klimatycznych. Według badań przeprowadzonych w 44 miastach w RFN, graniczna temperatura powietrza w sierpniu 1957 r. wynosiła $14,5 \div 17,3$ °C (w odniesieniu do maksymalnej w czasie doby). Stwierdzono, że zmiany dobowego poboru wody, w czasie wyjątkowo suchej i upalnej pogody, wynikały głównie z wahań temperatury powietrza oraz tygodniowego rozkładu pracy przemysłu i życia ludzi [2, 9]. Zwiększenie poboru wody wraz ze wzrostem temperatury powietrza w miesiącach letnich stwierdzono także w trzech miastach niemieckich, gdzie pobór ten rósł liniowo po przekroczeniu wartości granicznej wynoszącej $10 \div 12$ °C (w odniesieniu do temperatury średniej w dobie) [10]. W czasie badań przeprowadzonych w Wiedniu w lecie 1967 r. maksymalne pobory wody wystąpiły 26 czerwca oraz na przełomie lipca i sierpnia w dniach o bardzo wysokiej temperaturze powietrza (>30 °C) i braku opadów deszczu. Nawarstwiły się przy tym zwiększone potrzeby ludności (ruch turystyczny), przemysłu i zużycie wody do podlewania zieleni [9]. Na podstawie obserwacji przeprowadzonych w Warszawie w czasie od września 1970 r. do września 1971 r. stwierdzono związek między poborem wody a temperaturą i wilgotnością powietrza, a także występowaniem dni wolnych od pracy w czasie, gdy temperatura powietrza była większa od 10 °C, a jego wilgotność mniejsza od 75% [9].

Obszerne badania dobowego poboru wody w zależności od czynników meteorologicznych przeprowadzono w Politechnice Wrocławskiej w latach 80. XX w. [1, 2, 9, 11, 12]. Wykazały one, że graniczna temperatura powietrza w miastach centralnej i południowej Polski mieściła się w zakresie $10 \div 17$ °C (przy maksymalnej temperaturze w czasie doby). Wyznaczano ją analizując wartości współczynnika korelacji przy różnych wartościach granicznej temperatury powietrza. Korelacje między poborem wody a temperaturą powietrza, przy wartościach większych od temperatury granicznej, w sposób istotny opisywały równania regresji liniowej, określone oddzielnie w przypadku dni roboczych

oraz wolnych od pracy. Badania wykazały, że po przekroczeniu granicznej temperatury powietrza dobowy pobór wody wzrastał od ułamka do 1,5% na każdy stopień Celsjusza, w porównaniu do poboru wody przy temperaturze granicznej. Ogólnie stwierdzono, że wpływ temperatury powietrza na dobowy pobór wody rośnie wraz ze wzrostem standardu wyposażenia sanitarnego mieszkań i powierzchni terenów zraszanych wodą w okresie letnim oraz im mniejsze są straty wody wskutek przecieków w instalacjach budynków.

Na dobowy pobór wody może mieć także wpływ występowanie opadów atmosferycznych, w czasie których nie jest zużywana woda, np. do polewania terenów zielonych czy zraszania powierzchni ulic i placów. Przeprowadzone w Politechnice Wrocławskiej badania wykazały, że wpływ opadów atmosferycznych na zużycie wody był różny, w zależności od liczby mieszkańców miasta, jego charakteru i struktury potrzeb wodnych [2, 9, 11, 12]. Wykorzystując równania regresji wielokrotnej analizowano łączny wpływ temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na pobór wody tylko w dniach, kiedy temperatura powietrza była wyższa od wartości granicznej. Stwierdzono, że w części miast opady deszczu praktycznie nie miały wpływu na pobór wody, w niektórych zaś był on zauważalny w okresach wiosennych, a niekiedy wpływ opadów deszczu był większy niż temperatury powietrza [2, 9, 12]. Prowadzono także badania wpływu ciśnienia atmosferycznego, zakładając że w czasie wyżu barometrycznego może być zwiększone zużycie wody wywołane zdolnością organizmu człowieka do większego wysiłku fizycznego, ale badania statystyczne dały wynik negatywny [9].

Wszechstronne badania wpływu warunków klimatycznych na pobór wody w Austrii zaprezentowano w opracowaniu [13], w którym analizowano średni dobowy pobór wody odniesiony do jednego mieszkańca zaopatrywanego z wodociągu. W 2011 r. do systemów wodociągowych w Austrii wtłoczono średnio wodę w ilości $195 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$, z czego $135 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$ (70%) pobrano na potrzeby gospodarstw domowych, a po $30 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$ (15%) wynosił pobór na pozostałe cele komunalne oraz zużycie na potrzeby własne systemów wodociągowych i sieciowe straty wody. Szczegółową analizę przeprowadzono w odniesieniu do jednostkowego poboru wody przez gospodarstwa domowe i na inne cele komunalne łącznie (bez strat wody i potrzeb własnych wodociągów) w latach 2000–2009. Najważniejsze wnioski z badań były następujące:

- pobór wody był zmienny, w zależności od warunków pogodowych, pory roku, dnia tygodnia i godziny,

- pobór wody był zróżnicowany w poszczególnych regionach klimatycznych (wyróżniono cztery regiony) i w jednostkach osadniczych o różnym charakterze i funkcjach (w miastach i ośrodkach turystycznych średni pobór wynosił po ok. $200 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$, a w rejonach wiejskich prawie $150 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$),

- wykazano, że w każdej z badanych grup odbiorców wody podczas wysokich temperatur powietrza miał miejsce wzrost poboru wody o $50\div 100\%$ (w ośrodkach turystycznych nawet o 200%) w porównaniu do średniego poboru w dni chłodne; graniczna średnia dobowa temperatura powietrza, powyżej której obserwowano większe zużycie wody wynosiła $10\div 15^\circ\text{C}$,

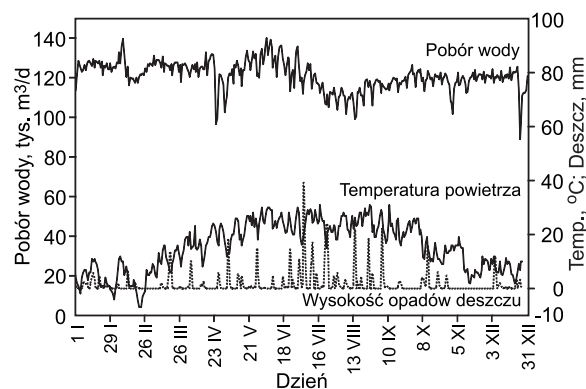
- tylko w sezonie letnim (w dniach o temperaturze wyższej od granicznej) widoczny był wpływ czasu trwania zarówno okresów suchych, jak i deszczowych na zużycie wody, którego zwiększenie przy wzroście temperatury

powietrza było mniejsze w czasie większych opadów deszczu, a większe w miarę wydłużania się czasu trwania pogody bezdeszczowej.

- korelacje między poborem wody a czasem usłonecznienia były analogiczne jak w wypadku zmian temperatury, natomiast wpływ wilgotności względnej powietrza był podobny do wpływu zmian czasu trwania okresów suchych i deszczowych; nie były to jednak zależności zbyt silne.

Warunki klimatyczne i pobór wody we Wrocławiu w 2011 r.

Analizując wpływ warunków meteorologicznych na pobór wody we Wrocławiu w 2011 r. wzięto pod uwagę zmiany temperatury powietrza i wysokości opadów deszczu, gdyż przede wszystkim te czynniki, jak wynika z dotychczasowych badań w kraju i za granicą, mają wymierny wpływ na pobór wody. Dane o dobowej temperaturze (T , $^\circ\text{C}$) powietrza i wysokości (H , mm) opadów deszczu pochodziły ze stacji meteorologicznej IMGW we Wrocławiu-Strachowicach [8], natomiast dane o dobowym poborze wody (Q , $\text{tys. m}^3/\text{d}$) uzyskano z MPWiK SA we Wrocławiu [7]. Zilustrowano je na rysunku 1.



Rys. 1. Dobowy pobór wody, maksymalna temperatura powietrza i wysokość opadów deszczu w 2011 r.

Fig. 1. Daily water demand, maximum air temperature and rainfall intensity (2011)

Klimat Wrocławia ma cechy typowego klimatu przejściowego strefy umiarkowanej, podlegającego wpływom oceanicznym i kontynentalnym. Specyfikę klimatu Wrocławia kształtuje położenie miasta w dolinie Odry i na przedpolu Sudetów, co powoduje jego uprzywilejowanie termiczne, określane jako „wrocławsko-opolski obszar ciepła”, które jest konsekwencją dynamicznego ogrzewania się mas powietrza osiadających po zawietrznej stronie masywu górskiego [14]. Ponadto, co jest charakterystyczne w przypadku dużych aglomeracji miejsko-przemysłowych, na klimat Wrocławia wpływa sposób zagospodarowania i użytkowania terenów zurbanizowanych.

W 2011 r. średnia dobowa temperatura powietrza zmieniała się od $-10,6^\circ\text{C}$ w lutym do $23,6^\circ\text{C}$ w czerwcu i $23,9^\circ\text{C}$ w sierpniu, a maksymalna dobowa odpowiednio od -7°C do 30°C i 31°C [8]. Najzimniejszym miesiącem był luty, najcieplejszymi zaś czerwiec i sierpień ze średnią temperaturą odpowiednio $-1,6^\circ\text{C}$, $18,9^\circ\text{C}$ i $19,2^\circ\text{C}$. Dni gorących, w których maksymalna temperatura przekroczyła 25°C było 59 (najwięcej w sierpniu – 17 i czerwcu – 16), w tym 4 dni były upalne (o temperaturze maksymalnej $>30^\circ\text{C}$). Dni mroźnych, z ujemną temperaturą maksymalną, było tylko 13 (4 w styczniu i 9 w lutym). Najniższą temperaturę minimalną $-17,4^\circ\text{C}$ zanotowano 24 lutego. Największa

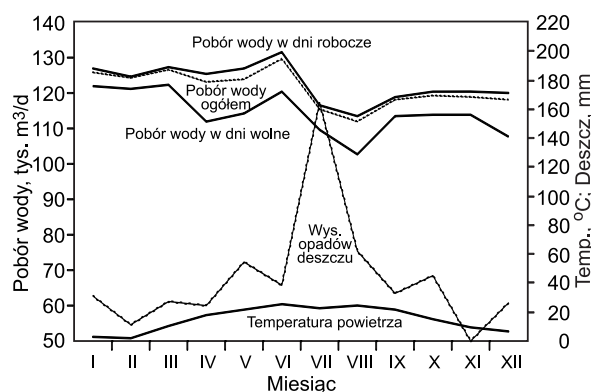
amplituda temperatury powietrza w 2011 r. wynosiła zatem 48,4 °C. Roczna suma usłonecznienia, czyli czas, w którym do powierzchni ziemi docierało promieniowanie bezpośrednie, wynosiła 2115 h, przeciętnie 5,8 h/d.

Opady deszczu występowały w ciągu 114 dni, a ich łączna wysokość wyniosła 518 mm. Najwięcej deszczu spadło w lipcu (165 mm), a najmniej w listopadzie (0 mm). Wilgotność względna powietrza była najmniejsza w czerwcu (47,2÷79,8%), a największa w styczniu (72,7÷98,0%). Średnie miesięczne ciśnienie atmosferyczne zmieniało się w przedziale 995,8÷1009,5 hPa [8].

Pobór wody we Wrocławiu, który w 2011 r. liczył około 632 tys. mieszkańców, określono w oparciu o ilość wody wtłoczonej do miasta przez dwie pompownie główne zlokalizowane w zakładzie wodociągowym „Na Grobli”, gdzie oczyszczana jest woda infiltracyjna i w zakładzie „Mokry Dwór” oczyszczającym wodę powierzchniową [7, 15]. Na ilość wody wtłoczonej przez pompownie, tj. na całkowity pobór składała się woda dostarczona wszystkim odbiorcom oraz woda stanowiąca straty i zużyta na potrzeby własne systemu wodno-ściekowego. W 2011 r. do sieci wodociągowej Wrocławia wtłoczono 44,239 mln m³ wody, zatem średni pobór wynosił 121 203 m³/d. Był on w 54,2% pokryty z pompowni „Na Grobli”, która tłoczy wodę do dzielnic o największej gęstości zaludnienia (nawet do 540 mieszkańców na hektar), tj. Śródmieścia, Starego Miasta i ich okolic. Nieco ponad 73% z ilości wody dostarczonej odbiorcom (36,149 mln m³) stanowił pobór wody przez gospodarstwa domowe. Pozostałe niecałe 27% pobrano do innych celów (usługi, komunikacja, mycie ulic i placów, podlewanie zieleni, produkcja).

Wpływ temperatury powietrza na pobór wody we Wrocławiu w 2011 r.

Z zaprezentowanych wcześniej wyników analiz wpływu temperatury powietrza na pobór wody w różnych systemach wodociągowych wynika, że wpływ ten występuje w okresie wiosenno-letnim i w warunkach, gdy temperatura powietrza przekracza wartość graniczną, zależną od lokalnych warunków klimatycznych. Dlatego zazwyczaj analizuje się zmiany poboru wody z podziałem na sezon wiosenno-letni o większym poborze wody i jesienno-zimowy o poborze mniejszym, co nie w każdym przypadku ma miejsce. W zależności bowiem od specyficznych funkcji i charakteru miasta duży wpływ na sezonowe, miesięczne, a także tygodniowe zmiany poboru wody mają inne czynniki, z których najważniejszy to zmieniająca się liczba mieszkańców. Sytuacja taka miała miejsce we Wrocławiu w analizowanym roku. Aby zatem ocena wpływu czynników meteorologicznych na pobór wody była jak najbardziej miarodajna, wyodrębniono w całym roku przedziały czasu, w których liczba mieszkańców była w miarę stała. Dokonano tego po szczegółowej analizie zmian poboru wody w poszczególnych dobach, tygodniach i miesiącach, uwzględniając terminy rozpoczęcia i zakończenia okresów, w których występowały migracje ludzi (rok szkolny, rok akademicki, ferie letnie, zimowe i świąteczne, urlopy), co częściowo omówiono w pracy [15]. Na tej podstawie przyjęto zasadę dokonywania oceny wpływu czynników meteorologicznych na pobór wody w poszczególnych miesiącach, a nie sezonach roku. We Wrocławiu było to konieczne, gdyż jak wynika z danych na rysunku 2, średnia dobowa ilość wody wtłoczonej do miasta w poszczególnych miesiącach letnich była bardzo



Rys. 2. Średni dobowy pobór wody, maksymalna temperatura powietrza i wysokość opadów deszczu w 2011 r.

Fig. 2. Average daily water demand, maximum air temperature and rainfall intensity (2011)

zróżnicowana, pomimo bardzo wysokiej i zbliżonej temperatury powietrza (średniej z maksymalnych dobowych w miesiącach). Świadczyło to o większym wpływie na pobór wody w tych miesiącach innych czynników niż meteorologiczne. Zmniejszenie poboru wody w lipcu i sierpniu, w porównaniu z poborem w czerwcu (odpowiednio o prawie 11% i 14%), można wytłumaczyć zmniejszeniem liczby odbiorców wody ze względu na wyjazd z Wrocławia studentów i mieszkańców podczas wakacji i urlopów. Stosując powyższą zasadę wyeliminowano więc wpływ zmiennej liczby mieszkańców w miesiącach letnich na pobór wody wynikający z warunków meteorologicznych, co nie miałyby miejsca, gdyby analizowano łącznie wszystkie dni w okresie letnim, w których temperatura powietrza była wyższa od temperatury granicznej. Badania przeprowadzono uwzględniając także zmienność poboru wody w cyklu tygodniowym, która charakteryzowała się w miarę wyrównanym poborem wody w dniach roboczych i nieznacznym wzrostem jego zużycia w soboty (śr. o 0,2% w roku), a stosunkowo dużym jego spadkiem w niedziele i święta (o 6,6%) (rys. 2) [15].

Z tego względu liczbowe zależności między poborem wody i temperaturą powietrza w poszczególnych miesiącach 2011 r. określono oddzielnie w dniach roboczych (z sobotami) oraz wolnych od pracy (niedziele i święta), z uwzględnieniem średniej oraz maksymalnej dobowej temperatury powietrza. Opisano je równaniami regresji liniowej, w przypadku których większym stopniem korelacji charakteryzowały się zależności między dobowym poborem wody (Q , tys. m³/d) a maksymalną dobową temperaturą powietrza (T_{maks} , °C). W dniach roboczych (łącznie z sobotami) istotne korelacje ($r > r_{kr}$) miały obserwacje w miesiącach letnich (od maja do sierpnia), o równaniach regresji w postaci:

– od 1 do 31 maja przy $T_{maks}=13\div 30$ °C ($r=0,8451$):

$$Q = 0,82608 T_{maks} + 108,193 \quad (1)$$

– od 1 do 30 czerwca przy $T_{maks}=20\div 30$ °C ($r=0,8144$):

$$Q = 1,37368 T_{maks} + 96,096 \quad (2)$$

– od 1 do 31 lipca przy $T_{maks}=15\div 29,5$ °C ($r=0,6808$):

$$Q = 0,99556 T_{maks} + 93,471 \quad (3)$$

– od 1 do 31 sierpnia przy $T_{maks}=19\div 31$ °C ($r=0,3599$):

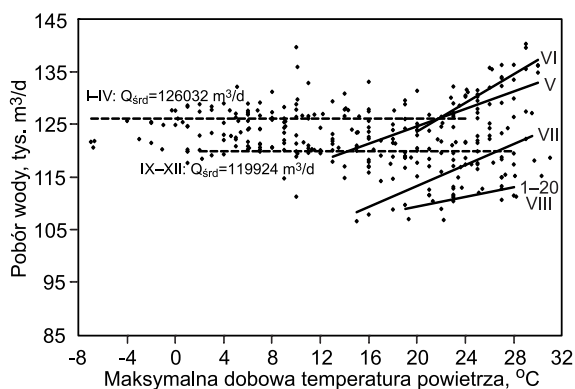
$$Q = 0,35876 T_{maks} + 104,537 \quad (4)$$

– od 1 do 20 sierpnia przy $T_{maks}=19\div 28$ °C ($r=0,6331$):

$$Q = 0,46732 T_{maks} + 99,959 \quad (5)$$

Związki między zmiennymi Q i T_{maks} były istotne statystycznie przy poziomie ufności $\alpha=0,001$, z wyjątkiem zależności (4) w przypadku danych z sierpnia, kiedy $\alpha=0,1$. Powodem tego był znaczny wzrost poboru wody w ostatnim tygodniu sierpnia ze względu na powrót mieszkańców z urlopów i ferii letnich przed rozpoczęciem roku szkolnego. Pomińcie tego tygodnia w analizie – wzór (5) – spowodowało zwiększenie istotności korelacji między poborem a temperaturą maksymalną ($r > r_{kr}$ przy $\alpha=0,001$).

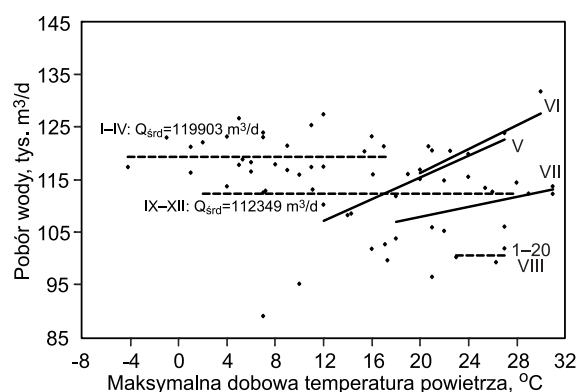
Na rysunku 3 przedstawiono graficzną ilustrację zależności (1)–(3) i (5) w miesiącach letnich oraz średni dobowy pobór wody od stycznia do kwietnia i od września do grudnia, w których nie stwierdzono istotnego wpływu temperatury powietrza na pobór wody. Zaobserwowany wzrost poboru wody w dniach roboczych i w soboty w miesiącach letnich we Wrocławiu wynikał ze zwiększonego zużycia wody w mieszkalnictwie i usługach oraz do podlewania zieleni, mycia ulic i placów. Największy dobowy pobór wody i jednocześnie największy jego wzrost miał miejsce w czerwcu, co spowodowane było utrzymującą się wysoką temperaturą powietrza ($T_{\text{maks}}=20\div 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) i małą wysokością opadów deszczu (39 mm w miesiącu, w tym 25 mm w dni robocze i soboty) (rys. 1 i 2). Przyrost dobowego poboru wody w czerwcu, przy wzroście maksymalnej temperatury powietrza o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, wynosił $1374\text{ m}^3/\text{d}$, czyli $1,112\%$ poboru przy temperaturze granicznej. W pozostałych miesiącach przyrost był mniejszy i wynosił $0,695\%$ w maju, $0,918\%$ w lipcu i $0,429\%$ od 1 do 20 sierpnia. Za graniczną temperaturę powietrza w poszczególnych miesiącach należy uznać najmniejszą jej wartość z maksymalnych dobowych temperatur powietrza, tj. $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ w maju, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ w czerwcu, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ w lipcu i $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ w sierpniu. Znaczne różnice w ilości wody wtłoczonej do sieci wodociągowej w miesiącach letnich wynikały ze zmiennej liczby mieszkańców przebywających w tym czasie w mieście. Przykładowo, przy tej samej temperaturze $T_{\text{maks}}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$ pobór wody w dniach roboczych w czerwcu wynosił $134\,560\text{ m}^3/\text{d}$, natomiast w lipcu był o 10% , a w sierpniu o 16% mniejszy (rys. 3).



Rys. 3. Dobowy pobór wody w zależności od temperatury powietrza w dni robocze i soboty 2011 r.

Fig. 3. Daily water demand according to air temperature (working days and Saturdays, 2011)

Pobór wody w dniach wolnych od pracy (niedziele i święta) był znacznie mniejszy niż w dniach roboczych wskutek ograniczenia zużycia wody przez mieszkańców, przemysł i instytucje użyteczności publicznej. Choć relacje między poborem wody a temperaturą powietrza w poszczególnych miesiącach (rys. 4) były analogiczne jak w wypadku dni roboczych (rys. 3), to z powodu małej liczby dni wolnych od pracy bardzo wysoką korelację między tymi wielkościami stwierdzono tylko w maju, kiedy tych dni było najwięcej (w czerwcu i lipcu korelacje były



Rys. 4. Dobowy pobór wody w zależności od temperatury powietrza w niedziele i święta 2011 r.

Fig. 4. Daily water demand according to air temperature (Sundays and holidays, 2011)

przeciętne). Pobór Q (tys. m^3/d) w maju rósł liniowo w zakresie temperatury $T_{\text{maks}}=12\div 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ według zależności (6) ($r=0,8451$; $r_{kr}=0,7545$ przy $\alpha=0,05$):

$$Q = 1,03571T_{\text{maks}} + 94,806 \quad (6)$$

Przyrost poboru wody w dni wolne od pracy w maju wynosił $0,966\%$ ze wzrostem temperatury powietrza o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, w porównaniu do poboru przy temperaturze $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. We wspólnym zakresie temperatur od $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ pobór wody w dni wolne był mniejszy odpowiednio o $10\,660\text{ m}^3/\text{d}$ (9%) i $7\,730\text{ m}^3/\text{d}$ (6%) niż w dni robocze.

Wpływ wysokości opadów atmosferycznych na pobór wody we Wrocławiu w 2011 r.

Pewien wpływ na pobór wody miały także opady atmosferyczne lub ich brak. Występowanie długotrwałych okresów bezdeszczowych i suchych, zwłaszcza w sezonie wiosenno-letnim, może powodować zwiększenie zużycia wody m.in. do podlewania terenów zielonych, zraszania powierzchni ulic i placów. Jednak duża różnorodność czynników wpływających na ilość wody tłoczonej do systemów wodociągowych powoduje, że wpływ opadów deszczu jest niekiedy niezauważalny.

We Wrocławiu roczna suma opadów deszczu w 2011 r. wynosiła 518 mm , w tym 297 mm (57%) spadło w czasie od 1 maja do 20 sierpnia. Największe opady deszczu wystąpiły w lipcu (165 mm , z czego 148 mm w dni robocze i soboty), a najmniejsze w czerwcu (odpowiednio 39 mm i 25 mm), który był najcieplejszym miesiącem w roku o średniej temperaturze z maksymalnych w czasie doby równej $25,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 1 i 2).

Zależność między poborem wody a wysokością opadu deszczu zbadano w miesiącach letnich, kiedy maksymalna temperatura powietrza była równa lub wyższa od temperatury granicznej. W tym celu przeprowadzono analizę statystyczną jednoczesnego wpływu wysokości opadów i maksymalnej temperatury powietrza na pobór wody w dni robocze i soboty. Oszacowane wartości współczynników korelacji wielokrotnej (R) były większe od wartości krytycznych (R_{kr}) tych współczynników przy poziomie ufności (α) równym $0,01$ i $0,05$, a mianowicie:

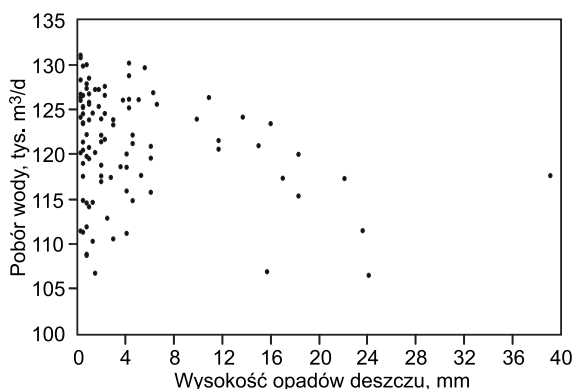
- w maju: $R=0,8458$, $R_{kr}=0,596$ przy $\alpha=0,01$,
- w czerwcu: $R=0,8320$, $R_{kr}=0,585$ przy $\alpha=0,01$,
- w lipcu: $R=0,6827$, $R_{kr}=0,574$ przy $\alpha=0,01$,
- w dniach 1–20 sierpnia: $R=0,6331$, $R_{kr}=0,590$ przy $\alpha=0,05$.

Z porównania wartości współczynników r – wzory (1)–(3) i (5) – oraz R można wnioskować, że zauważalny wpływ opadów deszczu na zmniejszenie poboru wody miał miejsce jedynie w czerwcu, czyli w miesiącu o najwyższej temperaturze powietrza ($20 \div 30^\circ\text{C}$), najmniejszej wysokości opadów deszczu ($\sum H = 25 \text{ mm}$), najmniejszej wilgotności powietrza ($47,2 \div 79,8\%$) i najdłużej trwających okresach pogody bezdeszczowej spośród analizowanych miesięcy letnich. Wpływ ten opisuje równanie (Q , tys. m^3/d):

$$Q = 1,28818 T_{\text{maks}} - 14,474 H + 98,466 \quad (7)$$

Brak zależności między poborem wody i opadami deszczu w pozostałych miesiącach letnich spowodowany był m.in. stosunkowo małą liczbą dni deszczowych, w tym o dobowej wysokości większej od $H = 10 \text{ mm}$ (rys. 5), a także spadkiem temperatury powietrza w czasie deszczu. Było to widoczne szczególnie w lipcu, w którym w ciągu 14 dni roboczych spadło 148 mm, a przez 6 dni wysokość opadów deszczu była większa od 10 mm.

Z danych na rysunku 5 wprawdzie wynika, że podczas opadów deszczu o $H \geq 10 \text{ mm}$ pobór wody wyraźnie malał, ale tylko z dlatego, że były to dane zgromadzone od marca do sierpnia, tj. z miesięcy o znacznie różniącym się poborze dobowym wody ze względu na różną liczbę mieszkańców przebywających w mieście. Z tego też względu ocena wpływu czynników meteorologicznych byłaby bardziej miarodajna, gdyby była możliwość oceny zmian poboru wody odniesionego do jednego mieszkańca korzystającego z wodociągu, zamiast poboru ogółem.



Rys. 5. Dobowy pobór wody i wysokość opadów deszczu (dni robocze i soboty 2011 r.)

Fig. 5. Daily water demand and rainfall intensity (working days and Saturdays, 2011)

Podsumowanie

Ogólny pobór wody w miastach, wyrażony ilością wody wtłoczonej do systemów wodociągowych, jak i zmienność poboru w czasie zależą głównie od wielkości miast (ze względu na liczbę mieszkańców), ich charakteru i podstawowych funkcji, a także od specyficznych warunków lokalnych, w tym klimatycznych. We Wrocławiu, podobnie jak w innych miastach, dominujący udział w poborze wody mają potrzeby gospodarstw domowych. W 2011 r. pobór wody przez mieszkańców stanowił 60% wody wtłoczonej do sieci wodociągowej i 73% wody pobranej przez wszystkich odbiorców (także na pozostałe cele komunalne). Wpływ liczby mieszkańców na pobór wody uwidocznił się szczególnie w lipcu i sierpniu, kiedy znacznie zmniejszyło się zużycie wskutek wyjazdu z Wrocławia mieszkańców i studentów w okresie urlopowym i wakacyjnym. Dlatego

w celu wyeliminowania wpływu czynnika demograficznego badania związków między poborem wody a czynnikami meteorologicznymi należy prowadzić w poszczególnych miesiącach (lub ich części) o w miarę stałej liczbie mieszkańców.

Z dokonanej analizy statystycznej danych z 2011 r. wynika, że istnieje bardzo wyraźny wpływ maksymalnej dobowej temperatury powietrza na dobowy pobór wody w okresie letnim, szczególnie w dni robocze i o temperaturze wyższej od $13 \div 15^\circ\text{C}$. W dniach o największej temperaturze maksymalnej – w maju, czerwcu, lipcu i sierpniu ($1 \div 20 \text{ VIII}$) – pobór wody był odpowiednio o 11,8%, 11,1%, 13,3% i 3,9% większy niż w dniach o najmniejszej temperaturze maksymalnej w tych miesiącach. Zauważalny wpływ wysokości opadów deszczu na zmniejszenie poboru wody stwierdzono w czerwcu, który był najcieplejszym i najbardziej suchym miesiącem w analizowanym roku.

LITERATURA

1. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK: Prognozowanie dobowego i godzinowego zużycia wody w miastach. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1982, nr 9–10, ss. 185–188.
2. Z. SIWOŃ: Stochastyczne modelowanie procesu zużycia wody i prognozowanie zapotrzebowania na wodę w miastach. *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej* 1986, Seria: Monografie nr 25.
3. E. MIELCARZEWICZ: Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2000.
4. P. LICZNAR, J. ŁOMOTOWSKI: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych Kohonena do prognozowania dobowego poboru wody. *Ochrona Środowiska* 2006, vol. 28, nr 1, ss. 45–48.
5. W. CIEŻAK, Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK: Modelowanie poboru wody w osiedlach mieszkaniowych. *Ochrona Środowiska* 2008, vol. 30, nr 2, ss. 23–28.
6. Z. SIWOŃ, J. ŁOMOTOWSKI, W. CIEŻAK, P. LICZNAR, J. CIEŻAK: Analiza i prognozowanie rozbiórów wody w systemach wodociągowych. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 2008.
7. Raporty dobowe produkcji wody we Wrocławiu w 2011 r. MPWiK SA we Wrocławiu (praca niepublikowana).
8. <http://www.ogimet.com/gsocd.phtml.en>.
9. S. BOGACZEWICZ, R. BULLA, E. W. MIELCARZEWICZ, Z. SIWOŃ: Analiza wpływu czynników meteorologicznych na wielkość dobowego zużycia wody. *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej* 1975, Seria Konferencje nr 6.
10. P.H. STRUCKMEIER: Untersuchungen über die Witterungsabhängigkeit des Wasserverbrauchs. *Gas- und Wasserfach. Wasser/Abwasser* 1975, 116, H. 2, S. 70–73.
11. E.W. MIELCARZEWICZ, Z. SIWOŃ: Untersuchungen der Korrelation zwischen den Faktoren, die den täglichen Wasserverbrauch bestimmen und der Größe dieses Verbrauch. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technische Universität Dresden* 1977, IG 26, H. 6.
12. Z. SIWOŃ, J. CIEŻAK: Über die den Stunden- und Tageswasserbedarf beeinflussenden Faktoren. *Gas- und Wasserfach. Wasser/Abwasser* 1981, Jg. 122, H. 8, S. 364–368.
13. R. NEUNTEUFEL [Ed.]: Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Wasser, Wien 2012 (http://www.lebensministerium.at/publikationen/wasser/wasserverbrauch_stud.html).
14. A. DUBICKI, M. DUBICKA, M. SZYMANOWSKI: Klimat Wrocławia. *Środowisko Wrocławia* 2002, ss. 9–25.
15. H. HOTŁOŚ, J. GŁOWACKA, A. KOŁODZIEJ: Zmienność poboru wody w systemie wodociągowym Wrocławia. *Ochrona Środowiska* 2012, vol. 34, nr 4, ss. 23–28.

Hotłoś, H. Analysis of Influence of Meteorological Factors on Water Demand Variations in Municipal Water Supply System. *Ochrona Srodowiska* 2013, Vol. 35, No. 2, pp. 57–62.

Abstract: Analysis of variations in daily water demand in relationship to meteorological factors, *i.e.* air temperature and rainfall intensity, was carried out for the city of Wrocław and the year 2011. 60% of water pumped into the supply system was consumed by households, 22% was used for other communal purposes, while 18% constituted water utilized by the system itself as well as water loss. Studies of the relationship between water demand and meteorological factors were performed for individual months, when the number of residents was almost constant. The relationship, in numbers, between water demand and air

temperature (average and maximum) as well as rainfall intensity was estimated separately for working days (including Saturdays) and non-working days (Sundays and holidays). The statistical analysis performed implies strong influence of maximum daily air temperature on daily water demand in summer months (from May until August). Water uptake in May, June and July on days with the highest maximum temperature was higher by 11.8%, 11.1% i 13.3% respectively, than on days with the lowest maximum temperature. A noticeable influence of rainfall intensity on decrease in water demand was identified on working days in June, the warmest and the driest month in the analyzed year.

Keywords: Water supply, water demand irregularity, air temperature, rainfall.