

Dynamiczne zawyżanie wskazań wodomierza wirnikowego wywołane poduszką powietrzną w pionie instalacyjnym – studium przypadku

Dynamic over-registration of a vane water meter induced by an air pocket in a vertical riser: a case study

Witold Paleczek^{1*} 

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska

* Kontakt / Correspondence: witold.paleczek@pcz.pl

Streszczenie:

Przedstawiono wpływ poduszki powietrznej powstającej w pionie instalacji po pracach na niższych kondygnacjach na zawyżenie wskazań wodomierzy wirnikowych. Sprężone pod licznikiem powietrze, uwiecznione wskutek braku odpowietrzenia, przy nagłym otwarciu przepływu (np. zaworu uruchamiającego spłuczkę) gwałtownie się rozpręża i uderza w łopatki wirnika, chwilowo go rozpędzając do czasu napłynięcia wody. Opracowano matematyczny model dynamiczny zjawiska, sprowadzony do postaci liniowej wraz z przykładami obliczeniowymi.

Słowa kluczowe: przepływ powietrza przez wodomierz, zawyżenie wskazań wodomierza, wodomierz wirnikowy, przepływ impulsowy, poduszka powietrzna w instalacji, mieszanina ciecz-gaz

Abstract:

The study presents the influence of an air pocket formed in a vertical water-supply riser after maintenance work on lower floors on the over-registration of vane-type water meters. Compressed air trapped beneath the meter due to insufficient venting rapidly expands when the flow is suddenly opened (e.g., by a flush valve actuator), striking the rotor blades and momentarily accelerating the impeller until water arrives and slows it down. A dynamic mathematical model of the phenomenon was developed, reduced to a linear form and supplemented with calculation examples.

Keywords: air flow through water meters, water meter over-registration, vane water meter, impulsive flow, air pocket in water installations, liquid-gas mixture

1. Wprowadzenie

W instalacjach wodociągowych budynków wielokondygnacyjnych często dochodzi do lokalnego opróżnienia przewodów podczas prac remontowych. Typowym scenariuszem eksploatacyjnym jest wymiana armatury na niższej kondygnacji, wymagająca zamknięcia zaworu odcinającego i opróżnienia fragmentu pionu. W wyniku grawitacyjnego spływu wody w przewodzie tworzą się liczne kieszenie powietrzne, które w miarę spływu wody łączą się, tworząc poduszkę powietrzną.

Jeżeli odcinek ten znajduje się bezpośrednio pod wodomierzem wirnikowym na najwyższej kondygnacji, to po przywróceniu zasilania instalacji uwiecznione powietrze zostaje sprężone do ciśnienia roboczego. Użytkownik najwyższej kondygnacji, nieinformowany o prowadzonych pracach, nie wykonuje bezpiecznego odpowietrzenia in-

stalacji, co prowadzi do czasowego zalegania poduszki powietrznej pod wodomierzem.

Pierwsze uruchomienie zaworu napełniającego zbiornik spłukujący powoduje nagłe otwarcie przepływu za wodomierzem. Sprężone powietrze ulega szybkiemu rozprężeniu, generując impuls przepływu o dużej intensywności, który chwilowo zwiększa prędkość obrotową wirnika. W rezultacie wodomierz rejestruje dodatkowe obroty niewspółmierne do rzeczywistego przepływu wody. Zjawisko to jest trudne do zaobserwowania bezpośrednio, lecz możliwe do zarejestrowania za pomocą rejestracji wideo.

2. Mechanizm powstawania zjawiska

Opróżnienie pionu w wyniku prac na niższej kondygnacji prowadzi do powstania poduszki powietrznej. Przywrócenie ciśnienia powoduje sprężenie uwiecznogo po-

wietrza do ciśnienia roboczego instalacji (np. 4–6 bar). Brak odpowietrzenia na najwyższej kondygnacji skutkuje utrzymaniem poduszki powietrznej bezpośrednio pod wodomierzem. Pierwsze otwarcie automatycznego zaworu napełniającego zbiornik spłukujący wywołuje gwałtowne rozprężenie powietrza i impuls przepływu. Impuls rozprężającego się powietrza z aerozolem wodnym powoduje gwałtowne rozpędzenie wirnika i rejestrację przepływu przez wodomierz. Nadmierne wskazanie obejmuje: rzeczywisty przepływ wody, przepływ sprężonego powietrza oraz dodatkowe obroty wynikające z bezwładności wirnika przy braku oporu hydraulicznego.

3. Czas trwania zjawiska

Jeżeli prace prowadzono jedną kondygnacją niżej, powstaje niewielka, zwarta poduszka powietrzna; jej rozprężenie trwa 2–3 s. Jeżeli prace prowadzono kilka kondygnacji niżej, w pionie gromadzi się większa objętość powietrza, tworzą się liczne lokalne pęcherze oraz złożona, niejednorodna mieszanina ciecz–gaz z aerozolem wodnym.

Po otwarciu przepływu obserwuje się: kolejne impulsy przepływu, przemieszczanie i łączenie pęcherzyków oraz wielokrotne przyspieszanie i hamowanie wirnika. W efekcie dochodzi do przejściowego zaburzenia pracy wodomierza, utrzymującego się przez 10–15 s – do czasu, aż napływająca woda ustabilizuje przepływ i przywróci prawidłowy pomiar.

4. Rzędy wielkości nadmiarowego wskazania: 1–100 dm³

Statyczna objętość gazu (1–2 dm³) nie wyjaśnia obserwowanych nadwyżek. Wyjaśnienie zapewnia model dynamiczny, uwzględniający: impuls przepływu rzędu 1–2 dm³/s, czas trwania 2–15 s, wielokrotne rozpędzanie wirnika, bezwładność powodującą dodatkowe obroty, nieliniową charakterystykę wodomierza przy dużych prędkościach. W rezultacie wodomierz może zarejestrować nadmiarowe wskazanie rzędu 1–100 dm³, mimo że rzeczywista ilość wody była niewielka.

5. Wnioski praktyczne

Poduszki powietrzne w pionach mogą prowadzić do znacznych błędów pomiarowych. Odpowietrzanie najwyższych kondygnacji po pracach instalacyjnych jest konieczne. Wodomierze mechaniczne są szczególnie podatne na impulsy przepływu. Opisane zjawisko jest zgodne z mechaniką mieszanin ciecz–gaz oraz dynamiką wirnika wodomierza.

6. Przegląd literatury przedmiotu

Zjawiska związane z obecnością uwięzionego powietrza w przewodach ciśnieniowych oraz ich wpływem na przepływy nieustalone były szeroko analizowane w hydraulicznych przepływach przejściowych. Klasyczne prace Berganta,

Tijsselinga i współautorów [1] wykazały, że nawet niewielkie objętości powietrza istotnie modyfikują amplitudę i przebieg fal ciśnienia, działając jak element sprężysty zdolny do akumulacji i gwałtownego uwalniania energii. Podobne wnioski przedstawili Zhou i Karney [2], którzy opisali dynamiczne rozprężanie poduszek powietrznych podczas napełniania przewodów oraz generowanie krótkotrwałych impulsów przepływu o intensywności przekraczającej wartości nominalne. Autorzy podkreślają, że przepływ powietrza może mieć charakter pulsacyjny, a sekwencja impulsów może utrzymywać się przez kilkanaście sekund do osiągnięcia stanu ustalonego.

W literaturze dotyczącej uderzeń hydraulicznych zwraca się uwagę, że obecność powietrza może zarówno tłumić, jak i wzmacniać zjawiska nieustalone, zależnie od lokalizacji i stopnia sprężenia poduszki. Ferreira, Ferras i Covas [3] wykazali, że powietrze w przewodzie stanowi aktywny element układu hydraulicznego, znacząco wpływający na dynamikę ciśnienia i prędkości przepływu. Wyniki badań eksperymentalnych Malesińskiej, Knapa, Kubraka i Kodury [4] potwierdzają, że uwięzione powietrze może generować złożone sekwencje impulsów przepływu, których charakter zależy od geometrii instalacji, długości opróżnionego odcinka oraz stopnia sprężenia gazu.

W kontekście metrologii przepływu istotne są prace dotyczące wpływu przepływów nieustalonych na dokładność wodomierzy mechanicznych. Wykazano, że impulsy przepływu o dużej intensywności i krótkim czasie narastania mogą prowadzić do dodatkowych obrotów wirnika, wynikających z jego bezwładności oraz nieliniowej charakterystyki momentu napędowego. W efekcie wodomierz rejestruje objętości niewspółmierne do rzeczywistego przepływu.

Zestawienie wyników badań literaturowych wskazuje jednoznacznie, że uwięzione poduszki powietrzne w przewodach wodociągowych mogą generować impulsy przepływu o istotnym znaczeniu dla dynamiki układu oraz dokładności pomiaru. Obserwacje przedstawione w niniejszym studium przypadku są zgodne z wynikami Pozos-Estrady [5], który podkreśla kluczową rolę lokalizacji poduszki powietrznej. Poduszka umiejscowiona bezpośrednio pod wodomierzem wywołuje szczególnie silny impuls przepływu, działający bezpośrednio na wirnik i prowadzący do dynamicznego zawyżenia wskazań.

7. Matematyczny liniowy model dynamiczny oddziaływania impulsu przepływu na wodomierz

W analizowanym problemie licznik został zamodelowany tak, jak wirnik o pewnej bezwładności, obracający się z prędkością kątową $\omega(t)$, do którego działają momenty: od przepływu medium (powietrze/woda), straty tarcia (łożyska, hamowanie magnetyczne, lepkość). Zależność (1) odpowiada standardowemu modelowi momentu hydrodynamicznego stosowanemu w przepływomierzach turbinowych: moment przepływu określa zależność [6–9]:

$$\tau_{hyd}(t) = k_t \cdot \rho \cdot v(t)^2 \quad (1)$$

gdzie:

k_τ – współczynnik aerodynamiczny wirnika z uwzględnieniem geometrii licznika, m^3

ρ – gęstość medium (powietrza/wody), kg/m^3

$v(t)$ – prędkość przepływu w przekroju wirnika, m/s

Moment strat (uproszczony: liniowy):

$$\tau_{str} = -b \cdot \omega(t) \quad (2)$$

gdzie:

b – współczynnik: tarcie w trakcie obrotów, Nms .

Równanie ruchu można określić wzorem:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_{hyda}(t) + \tau_{str}(t) = k_\tau \cdot \rho \cdot v(t)^2 - b \cdot \omega(t) \quad (3)$$

Powiązanie między prędkością kątową a przepływem objętościowym:

$$Q(t) = k_Q \cdot \omega(t) \quad (4)$$

gdzie:

k_Q – stała przeliczeniowa licznika, $m^3/obrót$

Objętość zarejestrowana przez licznik:

$$V_{ind} = \int_0^\infty Q(t)dt = k_Q \cdot \int_0^\infty \omega(t)dt \quad (5)$$

Faza „przedmuchu” – impuls momentu od sprężonego powietrza: przyjmując, że w odcinku rury przed licznikiem znajduje się kieszeń sprężonego powietrza o objętości V_{air} o ciśnieniu początkowym $P_0 > P_{wody}$, która w momencie otwarcia zaworu/ruszenia przepływu rozpręża się, generując impuls przepływu powietrza przez licznik, dając duży, krótkotrwały moment na wirnik, zatem można przyjąć uproszczony model jako impuls momentu:

$$I_\tau = \int_0^{T_{air}} \tau_{air}(t)dt \quad (6)$$

Impuls ten powoduje skok prędkości kątowej wirnika:

$$\omega_0 = \frac{I_\tau}{J} \quad (7)$$

Wchodząc w fazę wygaszania, gdy już napływa woda, czyli gdy przepływ maleje/stabilizuje się można wyizolować sam efekt przedmuchu, gdy powietrze dało impuls, wtedy zachodzi ω_0 , następnie przez krótki czas przyjmujemy, że dalszy moment hydrodynamiczny od powietrza jest zaniedbywalny, a licznik hamuje pod wpływem strat, to zachodzi:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -b\omega \Rightarrow \omega(t) = \omega_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

gdzie:

$\tau = \frac{J}{b}$ – stała czasowa wygaszania obrotów (charakterystyczny czas „zwalniania obrotów”), s

Wkład do zliczonej objętości tylko z efektu przedmuchu można otrzymać z zależności:

$$\Delta V_{air} = k_Q \int_0^\infty \omega(t)dt = k_Q \int_0^\infty \omega_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = k_Q \omega_0 \tau \quad (9)$$

Podstawienie (7) $\omega_0 = \frac{I_\tau}{J}$ do (9) prowadzi do wniosku, że nadmiarowo zarejestrowana objętość ΔV_{air} jest proporcjonalna do impulsu momentu od powietrza I_τ oraz odwrotnie proporcjonalna do efektów tarcia wyrażonych przez parametr b : wirnik o małym hamowaniu kręci się dłużej, a wynika to z formuły określonej wzorem:

$$\Delta V_{air} = k_Q \tau \frac{I_\tau}{J} = k_Q \frac{J I_\tau}{b J} = k_Q \frac{I_\tau}{b} \quad (10)$$

Powiązanie impulsu momentu z ciśnieniem powietrza można uzyskać łącząc ciśnienie powietrza w kieszeni P_0 , przekrój rury/wirnika A , promień efektywny działania siły na łopatki r oraz czas trwania przedmuchu T_{air} , co można opisać średnią siłą na łopatkach:

$$F_{air} \approx (P_0 - P_{down}) \cdot A_{ef} \quad (11)$$

Przy czym średni moment oraz impuls momentu można określić zależnościami:

$$\bar{\tau}_{air} \approx F_{air} \cdot r \text{ oraz } I_\tau = \tau_{air} \cdot T_{air} \quad (12), (13)$$

Które podstawione do wzoru ΔV_{air} prowadzą do zależności:

$$\Delta V_{air} \approx k_Q \frac{1}{b} \cdot F_{air} \cdot r \cdot T_{air} \quad (14)$$

W której zachodzi proporcjonalność:

$$\Delta V \propto (P_0 - P_{down}) \cdot T_{air} \quad (15)$$

Z powyższego wnioskujemy, iż: im większe nadciśnienie powietrza, im dłużej trwa „przedmuch”, im mniejsze hamowanie licznika (jeśli parametr b jest mały), tym większe zawyżenie wskazania ΔV .

Po uwzględnieniu modelu ruchu wirnika określonego wzorem (3), czyli $J \frac{d\omega}{dt} = \tau_{hyda}(t) + \tau_{str}(t) = k_\tau \cdot \rho \cdot v(t)^2 - b \cdot \omega(t)$, a następnie wykorzystując związek przepływu z ciśnieniem w fazie powietrze/woda, charakteryzujące się tym, że stosujemy uproszczony model korka powietrza rozprężającego się w odcinku rury, możemy przedstawić możliwość modelu kalibracji, w którym k_Q , b , k_τ kalibrowane są z testów z kontrolowanymi przedmuchi: wtedy model przewiduje ΔV dla dowolnych P_0 , T_{air} .

Jeżeli przyjmiemy, że średnie nadciśnienie powietrza w okresie działania na wirnik wynosi: $\Delta P = P_0 - P_{down}$, efektywny przekrój, przez który działa ciśnienie na łopatki A_{ef} , a efektywny promień działania siły to r_{ef} , wtedy średnia siła wyraża się wzorem (16) i uśredniony moment wzorem (17).

$$F_{air} \approx \Delta P \cdot A_{ef} \quad \tau_0 \approx F_{air} \cdot r_{ef} = \Delta P \cdot A_{ef} \cdot r_{ef} \quad (16), (17)$$

Po podstawieniu do (14) otrzymujemy model:

$$\Delta V \approx k_Q \frac{\Delta P \cdot A_{ef} \cdot r_{ef} \cdot T_{air}}{b} \quad (18)$$

w którym:

ΔP – nadciśnienie powietrza, N/m^2

T_{air} – czas trwania przedmuchu, s

A_{ef} , r_{ef} , b , k_Q – łącznie: jako współczynnik skalujący, lub zestaw parametrów ($A_{ef} [m^2]$, $r_{ef} [m]$, $b [kg \cdot m^2/s]$, $k_Q [m^3]$), w którym wartości można oszacować z faktycznej geometrii układu lub potraktować jako empiryczne parametry dopasowywane eksperymentalnie.

Impuls momentu hydrodynamicznego $I_\tau = \int_0^{T_{air}} \tau_{air}(t)dt$ [Nms] określony wzorem (6) można rozpatrywać jako model zgodny z logiką rozprężania (silny start, następnie słabnący impuls), to funkcję podcałkową można przyjąć jako:

$$\tau_{air}(t) = \tau \exp\left(\frac{-t}{T}\right)_{max} \quad (19)$$

gdzie:

τ_{max} – początkowy moment od „uderzenia” powietrza, Nm

T – charakterystyczny czas rozprężania/zanikania przedmuchu, s

Wtedy impuls można określić zależnością:

$$I_{\tau} = \int_0^{\infty} \tau_{max} \cdot e^{-\frac{t}{T}} dt = \tau_{max} \cdot T \quad (20)$$

Zatem powiązanie τ_{max} z ciśnieniem uzyskujemy z następujących zależności:

$$\Delta V_{air} = k_Q \frac{I_{\tau}}{b} = k_Q \frac{\tau_{max} T}{b} \quad (21)$$

$$\tau_{max} \approx \Delta P_0 \cdot A_{ef} \cdot r_{ef} \quad (22)$$

$$\Delta V_{air} \approx k_Q \frac{\Delta P_0 \cdot A_{ef} \cdot r_{ef} \cdot T}{b} \quad (23)$$

Zakładając dla uproszczenia obliczeń model powiązany liniowo z nadciśnieniem, to przy k_p – jako współczynnika scalającym, otrzymujemy model:

$$\tau_{max} \approx k_p \cdot \Delta P_0 \quad (24)$$

gdzie:

$$\Delta V_{air} = k_Q \frac{k_p \Delta P_0 T}{b} = K \cdot \Delta P_0 \quad (25)$$

Przy czym współczynnik $K = k_Q \cdot \frac{k_p T}{b}$ jest parametrem, który można wyznaczyć eksperymentalnie (np. z prób przy różnych nadciśnieniach powietrza): na przykład dla kilku różnych poziomów sprężenia powietrza ΔP_0 przy czym $\Delta P = P_{robocze} - P_{atmosferyczne}$ (np. 0,5 bar, 1 bar, 1,5 bar nadciśnienia), a dla każdej wartości mierzymy faktyczną objętość wody V_{real} , odczyt z licznika V_{ind} , a z nich obliczamy $\Delta V_{air} = V_{ind} - V_{real}$. Dane liczbowe dopasowujemy do prostej $\Delta V_{air} \approx K \cdot \Delta P_0$ otrzymując empirycznie określony współczynnik K , czyli pośrednio kombinacje parametrów k_Q, k_p, T, b .

Zaletą otrzymanego modelu jest rdzeń fizyczny (moment od ciśnienia, impuls, hamowanie), a jednocześnie prostota statystyczna otrzymanego wzoru (liniowa zależność od ΔP_0) i możliwość bezpośredniego użycia do korekty odczytów (lub odnośnej argumentacji technicznej).

Sprawdzeniem uzyskanego modelu będzie określenie typowych rzędów wielkości dla małego licznika wirnikowego (DN15, DN20: jeden obrót wirnika \approx od 0,5 do 2 dm³). Efektywną powierzchnię działania powietrza na łopatkę wirnika A_{ef} oszacowano na podstawie typowych wymiarów wirnika wodomierza DN15 zgodnych z normą [10], traktując ją jako parametr efektywny obejmujący geometrię łopatek i lokalną strukturę przepływu.

Obliczamy:

$$k_Q \approx \frac{V_{na_obrót}}{2\pi} \Rightarrow (0,5 \div 2) \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{rad};$$

efektywne pole działania powietrza na łopatkę wirnika:

$$A_{ef} \approx 10^{-5} \div 10^{-4} \text{ m}^2;$$

efektywny promień: $r_{ef} \approx 5 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$,

$$k_p \approx A_{ef} r_{ef} \approx 10^{-8} \div 10^{-6} \text{ Nm}/\text{Pa};$$

$$T \approx 0,01 \div 0,3 \text{ s};$$

$$J \approx 10^{-7} \div 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$\tau_{mech} = \frac{J}{b} \approx 1 \div 5 \text{ (s)};$$

$$b = \frac{J}{\tau_{mech}} \approx 10^{-7} \div 10^{-6} \text{ Nms}.$$

Zakładając w przykładzie środkowe wartości empirycznych przedziałów, tzn.: $k_Q \approx 10^{-4} \text{ m}^3/\text{rad}$, $k_p \approx 10^{-7} \text{ Nm}/\text{Pa}$, $T \approx 0,05 \text{ s}$, $b \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ Nms}$, otrzymujemy:

$$K = k_Q \frac{k_p T}{b} \approx 10^{-4} \cdot \frac{10^{-7} \cdot 0,05}{5 \cdot 10^{-7}} \approx 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa},$$

czyli orientacyjnie $K \approx 10^{-8} \div 10^{-6} \text{ m}^3/\text{Pa}$ przy proporcji $\Delta P_0 = 1 \text{ bar} = 10000 \text{ Pa}$, otrzymując wynik:

$$\Delta V_{air} \approx 10^{-8} \cdot 10^5 \div 10^{-6} \cdot 10^5 = 10^{-3} \div 10^{-1} \text{ m}^3 \Rightarrow$$

$V_{min_air} = 1 \div V_{max_air} = 100 \text{ dm}^3$ /każdy bar sprężonego powietrza w rurach.

Statyczny model uwzględniający tylko geometryczną różnicę w objętości sprężonego powietrza bez uwzględnienia rzeczywistego, nagłego udaru rozprężającego się korka powietrza prowadzącego do powstania dynamicznego impulsu na wirnik wodomierza, to model oparty jedynie na prawie Boyle’a, czyli $P_0 V_0 = P_1 V_1$: np. początkowa objętość poduszki na długości przewodu L i średnicy D :

$$V_0 = \frac{\pi D^2}{4} L \text{ po sprężeniu: } V_1 = V_0 \frac{P_0}{P_1}; \text{ różnica objętości}$$

(zmniejszenie podczas sprężania): $V_{BOYLE'A} = \Delta V =$

$$V_0 - V_1 = V_0 \left(1 - \frac{P_0}{P_1}\right); \text{ obliczenie: } D = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m};$$

$L_{np} = 27 \text{ m}; V_0 = (0,025 \pi^2/4) \cdot 27 \approx 0,013 \text{ m}^3 = 13 \text{ dm}^3$; nato-

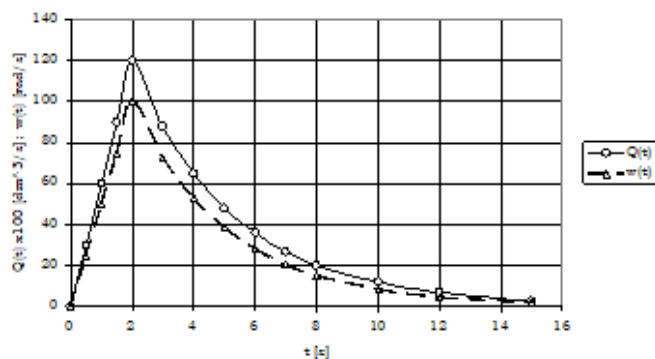
miast po sprężeniu: $V_1 = V_0 \frac{P_0}{P_1} \Rightarrow V_1 = 0,013/3 \approx 0,004 \text{ m}^3$;

$$V_{BOYLE'A} = \Delta V = V_0 - V_1 = V_0 \left(1 - \frac{P_0}{P_1}\right) \Rightarrow V_0 - V_1 = 0,013 - 0,004 = 0,009 \text{ m}^3 = 9 \text{ dm}^3$$

W modelu statycznym, opartym na geometrii układu i prawie Boyle’a, lecz nieuwzględniającym energetycznego efektu udaru sprężonego powietrza na wirnik, otrzymujemy wynik zaniżony, choć mieszczący się w zakresie wartości przewidywanych przez model dynamiczny: $V_{min_air} < V_{BOYLE'A} < V_{max_air}$. Model statyczny odtwarza jedynie początkową, najłagodniejszą fazę zjawiska: uzyskany wynik (≈ 9) mieści się w pierwszym dekanie odpowiedzi dynamicznej (1–100). Jest to konsekwencja braku uwzględnienia impulsu energetycznego związanego z rozprężaniem powietrza, który w modelu dynamicznym znacząco zwiększa amplitudę odpowiedzi.

Na rys. 1 przedstawiono wykres zależności w modelu pojedynczego impulsu przepływu $Q(t)$ w dm³/s oraz prędkości kątowej wirnika $\omega(t) = w(t)$ w rad/s. W celu umożliwienia ich wspólnej prezentacji na jednym wykresie wartości $Q(t)$ przeskalowano, mnożąc je przez 100. Widoczny jest gwałtowny impuls przepływu powoduje szybkie

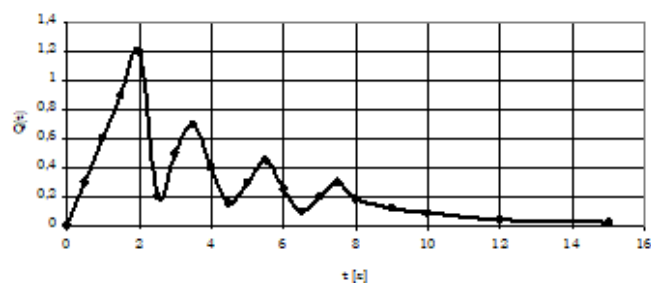
przyspieszenie wirnika, a jego ruch wygasa wolniej dzięki bezwładności, co prowadzi do dodatkowych obrotów i nadmiarowego wskazania wodomierza. W pierwszej fazie (0–2 s) obserwuje się gwałtowny wzrost przepływu, natomiast w fazie drugiej przepływ wygasa wykładniczo w wyniku zaniku energii sprężystej i stabilizacji warunków hydraulicznych.



Rys. 1. Porównanie przeskalowanego przepływu (pomnożonego przez 100 w celu umożliwienia wspólnej prezentacji na wykresie) z impulsem przepływu $Q(t)$ w dm^3/s oraz prędkością kątową wirnika $\omega(t) = w(t)$ w rad/s

Fig. 1. Comparison of the rescaled flow rate (multiplied by 100 to enable joint presentation on a single plot) with the flow impulse $Q(t)$ dm^3/s and the rotor angular velocity $\omega(t) = w(t)$ rad/s

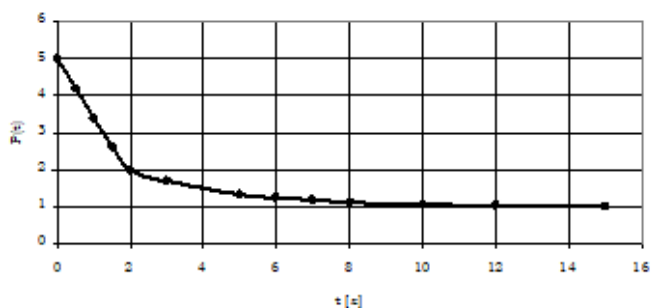
Rys. 2 przedstawia przykładową sekwencję impulsów przepływu $Q(t)$ w długim pionie instalacji wodociągowej po rozprężeniu rozciągniętej poduszki powietrznej. Widoczne są kolejne impulsy odpowiadające rozprężaniu lokalnych poduszek powietrza na niższych kondygnacjach oraz stopniowe wygaszanie zjawiska.



Rys. 2. Sekwencja impulsów przepływu $Q(t)$ w długim pionie instalacji wodociągowej po rozprężeniu rozciągniętej poduszki powietrznej

Fig. 2. Sequence of flow impulses $Q(t)$ in a long vertical riser of a water supply installation following the expansion of an elongated air pocket

Dla porównania na rys. 2 zamieszczono przebieg wieloimpulsowy $Q(t)$ ukazujący kolejne impulsy związane z rozprężaniem lokalnych poduszek powietrza na niższych kondygnacjach oraz stopniowe wygaszanie zjawiska. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmian ciśnienia $P(t)$ podczas rozprężania poduszki powietrznej. Obserwuje się gwałtowny spadek ciśnienia w pierwszej fazie (0–2 s), natomiast w fazie drugiej następuje łagodne wygaszanie w kierunku ciśnienia statycznego instalacji.



Rys. 3. Ciśnienie $P(t)$: przykładowy przebieg ciśnienia w poduszce powietrznej podczas jej rozprężania

Fig. 3. Pressure $P(t)$: an example of the pressure evolution inside the air pocket during its expansion

8. Wnioski końcowe

Przeprowadzone studium przypadku jednoznacznie potwierdza, że obecność uwięzionej poduszki powietrznej w pionie instalacji wodociągowej może prowadzić do istotnych zaburzeń pracy wodomierza wirnikowego. Sprężone powietrze działa jak element sprężysty, zdolny do krótkotrwałego magazynowania energii i jej gwałtownego uwalniania podczas pierwszego otwarcia przepływu. W efekcie powstaje impuls przepływu o intensywności znacznie przekraczającej wartości nominalne, co prowadzi do dynamicznego rozpędzenia wirnika i rejestracji dodatkowych obrotów niewspółmiernych do rzeczywistej objętości przepływającej wody.

Zjawisko to jest szczególnie wyraźne w budynkach wielokondygnacyjnych, gdzie prace instalacyjne na niższych kondygnacjach mogą powodować powstanie rozciągniętej poduszki powietrznej, generującej sekwencję impulsów przepływu trwającą nawet 10–15 s. W takich warunkach nadmierowe wskazania wodomierza mogą osiągać rząd $1\text{--}100 \text{ dm}^3$, mimo że rzeczywista ilość przepływającej wody pozostaje niewielka.

Wyniki analizy wskazują, że zjawiska nieustalone związane z przepływem mieszaniny ciecz–gaz powinny być uwzględniane zarówno na etapie projektowania, jak i eksploatacji instalacji wodociągowych. Szczególnie znaczenie ma staranne odpowietrzanie przewodów po pracach serwisowych oraz świadomość, że błędy pomiarowe wodomierzy wirnikowych mogą wynikać nie z wad urządzenia, lecz z dynamicznych efektów przepływu wywołanych obecnością sprężonego powietrza.

Przedstawione studium przypadku podkreśla potrzebę dalszych badań nad wpływem przepływów impulsowych na dokładność wodomierzy wirnikowych oraz nad metodami ograniczania skutków uwięzionego powietrza w instalacjach. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do opracowania wytycznych eksploatacyjnych i procedur serwisowych, które pozwolą zminimalizować ryzyko występowania podobnych zjawisk w praktyce.

9. Bibliografia

- [1] Bergant, Anton, Arris S. Tijsseling, Young-il Kim, Uroš Ka-

- radžić, Ling Zhou, Martin F. Lambert, and Angus R. Simpson. (2018). Unsteady pressures influenced by trapped air pockets in water-filled pipelines. *Journal of Mechanical Engineering*, 64(6), 351–362, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2018.5238>
- [2] Zhou, Ling, Huan Wang, Bryan Karney, Deyou Liu, Pei Wang, and Su Guo. (2018). Dynamic Behavior of Entrapped Air Pocket in a Water Filling Pipeline. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(8), 04018036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001491](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001491)
- [3] Ferreira, J.P., Buttarazzi, N., Ferras, D., & Covas, D.I.C. (2021). Effect of an entrapped air pocket on hydraulic transients in pressurized pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 59(6), 1018–1030. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1862323>
- [4] Malesińska A., Knap L., Kubrak M., Kodura A. (2025). Experimental Analysis of Changes in the Behavior of a Trapped Air Pocket in a Blind Section of a Rapidly Filling Water Pipe. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 31 (3), 497–513. <https://doi.org/10.1080/09715010.2025.2486482>
- [5] PozosEstrada O. (2025). Influence of entrapped air on hydraulic transients during rapid closure of a valve located upstream and downstream of an air pocket in pressurised pipes. *Water*, 17 (7), 927. <https://doi.org/10.3390/w17070927>
- [6] Dixon, S. L., Hall C. (2014). Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery. 7th ed. Oxford: Elsevier.
- [7] Lynnworth, L. C. (2005). Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications. Burlington, MA: Academic Press.
- [8] White F. M. (2011). Fluid mechanics. 7th ed. New York: McGraw-Hill.
- [9] Gülich J. F. (2010). Centrifugal pumps. 2nd ed. Berlin: Springer.
- [10] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN ISO 4064-1:2025-08. Water meters for cold drinking water and hot water – Part 1: Metrological and technical requirements [Wodomierze do wody zimnej pitnej i wody gorącej – Część 1: Wymagania metrologiczne i techniczne]. Warszawa: PKN, 2025.