

Przypadki procesów wyrównywania ciśnienia powietrza w komorach zbiorczych energooszczędnego zbiornika retencyjno-przerzutowego

Cases of air pressure equalization processes in storage chambers of an energy-saving retention-transfer reservoir

ROBERT MALMUR

DOI 10.36119/15.2022.12.11

Intensywne opady deszczu, a także szybkie topnienie śniegu, powodują często podtapianie terenów chronionych i przepełnianie istniejących sieci kanalizacyjnych. Sytuacje takie są uciążliwe dla mieszkańców, a także powodują znaczne straty materialne. Jednym z możliwych rozwiązań technicznych zapewniającym niezawodny odpływ ścieków do odbiornika jest przedstawiony w artykule energooszczędny zbiornik retencyjno – przerzutowy. Zbiornik retencyjno – przerzutowy ma za zadanie gromadzić odpowiednią ilość wód opadowych, a następnie przerzucić je do odbiorników wodnych, w przypadku, gdy nie jest możliwy ich odpływ grawitacyjny. Przerzut ścieków odbywa się poprzez zastosowanie układu sprężarek i odpowiednie połączenie układów tłoczących. Natomiast grawitacyjne odprowadzanie ścieków do odbiornika realizowane jest przez ich tranzytowy przepływ przez komory zbiornika.

W artykule przedstawiono zasadę działania opracowanego przez Autora zbiornika retencyjno – przerzutowego w wersji energooszczędnej. Efekt energooszczędnego działania zbiornika uzyskiwany jest podczas procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych zbiornika. W artykule przedstawiono dwa charakterystyczne przypadki procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w komorach zbiorczych zbiornika w zależności od poziomu napełnienia w odbiorniku wodnym.

Słowa kluczowe: zbiorniki przerzutowe, retencyjne zbiorniki kanalizacyjne, przerzut ścieków, retencja, kanalizacja deszczowa.

Intensive rainfalls and snow melting often cause floods of protected terrains and overflowing of existing sewage systems. Such situations are burdensome for inhabitants, and also may cause considerable material losses. The paper presents one of the possible technical solutions ensuring reliable outflow of wastewater to the receiver, namely the energy-saving retention and transfer reservoir. When the gravitational outflow is limited, the task of the transfer reservoir is to store a certain volume of wastewaters and discharge them to receiving waters. Wastewater is transferred with the use of a system of compressors and an appropriate combination of pumping systems. During low flows wastewaters are conveyed gravitationally to receiving waters through the transit chamber.

This article presents the principle of operation of the transfer reservoir in the energy-saving version. The effect of energy-saving operation of the reservoir is obtained during the process of equalizing the air pressure in both storage chambers of the reservoir isolated from the atmosphere. The article presents two characteristic cases of the air pressure equalization process in the reservoir's storage chambers depending on the filling level in the water receiver.

Keywords: transfer reservoirs, retention sewage reservoirs, sewage transfer, retention, drainage system

Wprowadzenie

Dotychczas stosowane sposoby odprowadzania wód opadowych polegają na ich odpływie za pomocą kolektora zrzutowego umiejscowionego pod wałem przeciwpowodziowym rzeki [1, 2, 3, 4]. Kolek-

tor zrzutowy posiada wylot usytuowany wysokościami z reguły powyżej koryta rzeki na poziomie średnich stanów wody. Na jego wylocie zainstalowany jest zwrotny zawór kłapowy mający na celu niedopuszczenie do podtopienia terenów chronionych. Zawory kłapowe uniemożliwiają

bowiem wytworzenie się tzw. cofki powodowanej wysokimi stanami wody w rzece. W praktyce nie zawsze takie zawory są stosowane, natomiast tam gdzie zostały zamontowane często pozbawione są właściwego nadzoru i konserwacji w wyniku czego ich stan techniczny uniemożliwia ich

dr inż. Robert Malmur <https://orcid.org/0000-0003-1916-8666> – Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Częstochowa. Adres do korespondencji/ Corresponding author: robert.malmur@pcz.pl

prawidłowe działanie. Niezabezpieczone wyloty kolektorów zrzutowych, bądź też nieprawidłowe zadziałanie zaworu klapowego stają się często przyczyną licznych podtopień terenów i dzielnic mieszkalnych w wielu miastach Polski [5, 6, 7, 8].

Do nowoczesnych systemów przerzutu wód opadowych można zaliczyć zbiorniki retencyjno – przerzutowe [9, 10, 11], które opracowano dla potrzeb przerzutu wód pochodzących z opadów atmosferycznych do odbiornika wodnego. Potrzeba przerzutu wód opadowych występuje wówczas, gdy uniemożliwiony jest okresowo lub całkowicie ich grawitacyjny odpływ. Okresowe uniemożliwienie odpływu wód opadowych może być spowodowane wysokimi stanami napełnienia w rzece, które występują w okresie intensywnych opadów. Natomiast całkowite, gdy odwadnianie terenów są położone depresyjnie w stosunku do wysokich stanów wód w odbiorniku wodnym [12, 13].

Wspólną cechą rozwiązań zbiorników retencyjno – przerzutowych jest to, że są zlokalizowane od strony terenu odwadnianego, tuż przy wale przeciwpowodziowym. Zbiorniki retencyjno – przerzutowe można stosować w następujących przypadkach [14, 15]:

- w systemie kanalizacji rozdzielczej u wylotów głównych kolektorów sieci deszczowej;
- w systemie kanalizacji ogólnospławnej u wylotów kanałów burzowych;
- w systemie kanalizacji ogólnospławnej u wylotów kanałów burzowych z jednoczesnym przepompowaniem ścieków bytowo – gospodarczych i przemysłowych do oczyszczalni ścieków;
- w przypadku kolektorów odprowadzających ścieki oczyszczone z oczyszczalni.

Wstępne analizy hydraulicznego działania zbiornika retencyjno – przerzutowego pozwoliły na stwierdzenie, że uzyskanie najefektywniejszego sposobu przerzutu cieczy na wyższy poziom energetyczny zapewnić mogą, naprzemiennie działające w procesach napełniania i opróżniania, dwie komory zbiorcze zbiornika retencyjno – przerzutowego. Ciągłość naprzemiennego działania komór zbiorczych zbiornika retencyjno – przerzutowego jest zapewniona przez przetrzymanie sprężonego powietrza w komorze uprzednio opróżnionej z cieczy do czasu całkowitego wypełnienia cieczą drugiej komory. Uzyskanie efektu oszczędności energii elektrycznej, zostaje osiągnięte podczas wyrównywania ciśnienia powietrza zawartego w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych. Proces ten zaczyna się

od chwili, w której nastąpiło całkowite wypełnienie cieczą jednej z komór przy utrzymanym sprężonym powietrzu we wnętrzu komory drugiej, uprzednio opróżnionej. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie budowy i zasady działania zbiornika retencyjno – przerzutowego w wersji energooszczędnej, a także opis matematyczny dwóch charakterystycznych przypadków procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w komorach zbiornika.

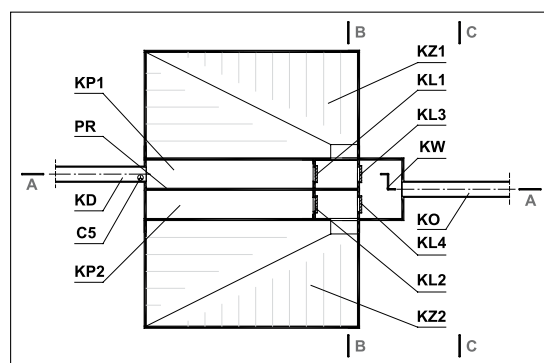
Budowa zbiornika retencyjno – przerzutowego w wersji podstawowej

Zbiornik retencyjno – przerzutowy [9] przeznaczony jest do umożliwienia swo-

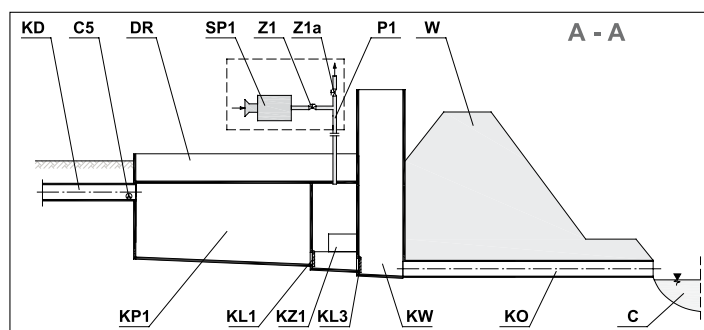
obodnego względnie wymuszonego odpływu wód pochodzących z opadów atmosferycznych do odbiornika wodnego. Stanowi on rozwiązanie skuteczne i bardziej niezawodne w działaniu od dotychczasowych rozwiązań, takich jak przepompownie, lub też inne zbiorniki przerzutowe typu PLUVIUS [10, 11].

Zbiornik retencyjno – przerzutowy posiada komorę przepływową KP1, połączoną w górnej strefie z kanałem dopływowym KD cieczy i komorę przelewową KP2 (rys. 1a, 1b, 1c, 1d, 1e). Komora przepływowa KP1 i komora przelewowa KP2 oddzielone są od siebie przegrodą PR z przelewem szczytowym. Komora przepływowa KP1 połączona jest poprzez zamknięcie klapowe KL1 z gazoszczelną komorą

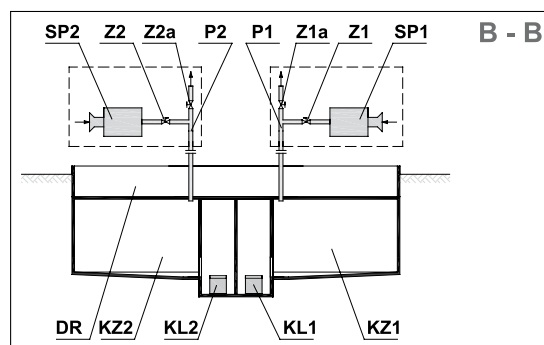
Rys. 1a. Rozwiązanie zbiornika retencyjno – przerzutowego: rzut z góry
Fig. 1a. Solution of transfer reservoir: top view



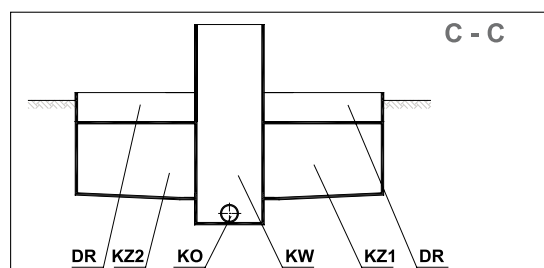
Rys. 1b. Przykładowe rozwiązanie zbiornika retencyjno – przerzutowego: przekrój A – A
Fig. 1b. Solution of transfer reservoir: section A – A

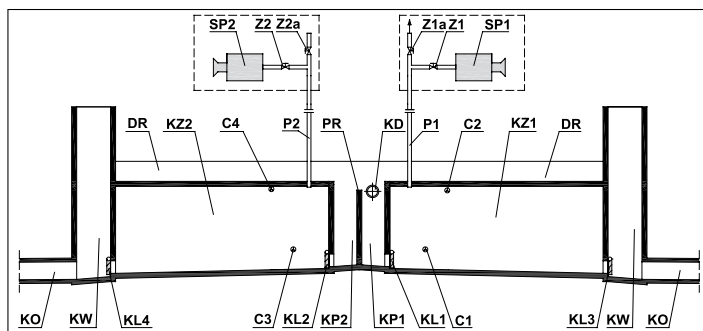


Rys. 1c. Przykładowe rozwiązanie zbiornika retencyjno – przerzutowego: przekrój B – B
Fig. 1c. Solution of transfer reservoir: section B – B



Rys. 1d. Przykładowe rozwiązanie zbiornika retencyjno – przerzutowego: przekrój C – C
Fig. 1d. Solution of transfer reservoir: section C – C





Rys. 1e.
Schemat ideowy
zbiornika reten-
cyjno – przerzu-
towego
Fig. 1e. Schematic
diagram of transfer
reservoir

Osiągnięcie takiego stanu spowoduje włączenie jednej ze sprężarek poprzez odpowiednie sterowanie czujnikami i zaworami odcinającymi, przyczyniając się do odcięcia od atmosfery całkowicie wypełnionej cieczą pierwszej komory zbiorczej – rozpocznie się proces opróżniania tej komory.

Wzrost ciśnienia powietrza włączanego przez sprężarkę do wnętrza opróżnianej pierwszej komory zbiorczej będzie powodować odpływ cieczy z tej komory

zbiorczą KZ1, a komora przelewowa poprzez zamknięcie klapowe KL2 z drugą gazoszczelną komorą zbiorczą KZ2. Obie komory zbiorcze KZ1 i KZ2 poprzez zamknięcia klapowe KL3 i KL4 są połączone z komorą wieżową KW. Komora wieżowa KW o wysokości większej od rzędnej korony wafu przeciwpowodziowego W jest połączona z ciekim wodnym C za pośrednictwem kolektora odpływowego KO.

Zamknięcia klapowe KL1, KL2, KL3, KL4 działają samoczynnie i otwierane są parciem hydrostatycznym, umożliwiając tylko jednokierunkowy przepływ cieczy.

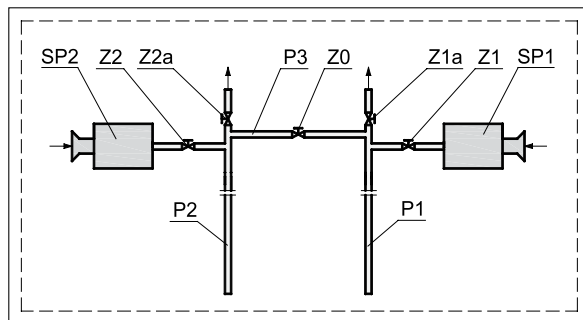
Na stropach komór zbiorczych umieszczono przewody rurowe P1 i P2 łączące za pośrednictwem zaworów odcinających Z1, Z1a, Z2 i Z2a strefę podstropową komór ze sprężarkami SP1 i SP2 lub atmosferą. Działanie zaworów odcinających i sprężarek powietrza sterowane jest przy pomocy czujników poziomu cieczy C1, C2, C3 i C4.

Zasada działania energooszczędnego zbiornika retencyjno – przerzutowego

Energooszczędna wersja działania zbiornika retencyjno – przerzutowego wymaga instalacji przewodu rurowego P3 (rys. 2) wraz z zaworem odcinającym Z0, łączącym obie komory zbiorcze w ich strefach stropowych oraz zapewnienia dodatkowej pojemności retencyjnej DR (rys. 1b, 1c, 1d, 1e) usytuowanej na stropach komór zbiorczych. Dodatkowa pojemność retencyjna ma za zadanie przyjęcie dopływającej cieczy do zbiornika w czasie trwania procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w jego obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych, lecz tylko w takich przypadkach, gdy zdolność do akumulacji cieczy przez zbiornik zostałaby chwilowo utracona.

Ciecz dopływająca kolektorem dopływowym lub rowem dopływowym do komory przepływowej zbiornika przez otwartą klapę napędza pierwszą komorę zbiorczą. Podczas wypełniania komory zbiorczej zawory odcinające są otwarte

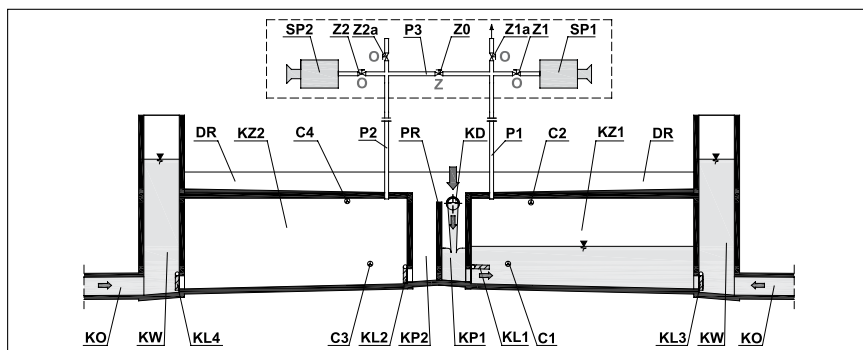
Rys. 2.
Instalacja sprężarek powietrza oraz zaworów odcinających na przewodach rurowych łączących komory zbiorcze zbiornika retencyjno – przerzutowego
Fig. 2. Installation of air compressors and shut-off valves on pipelines connecting the storage chambers of the transfer reservoir



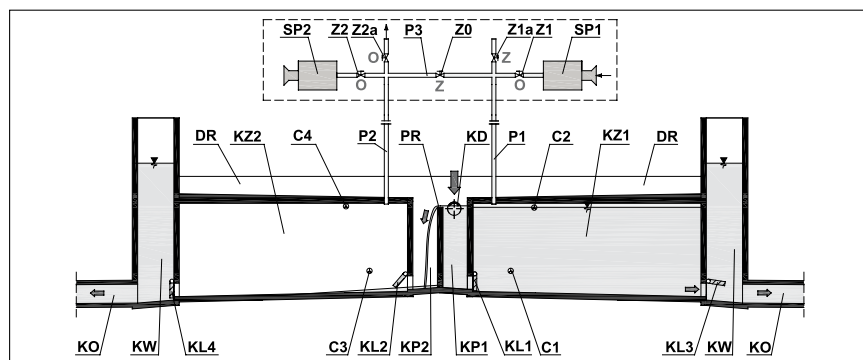
(O), umożliwiając odpływ powietrza z tej komory do atmosfery, natomiast zawór odcinający Z0 na przewodzie P3 jest zamknięty (Z) (rys. 3).

Proces napełniania pierwszej komory zbiorczej zostaje zakończony, gdy całkowicie wypełnieni się ona cieczą (rys. 4).

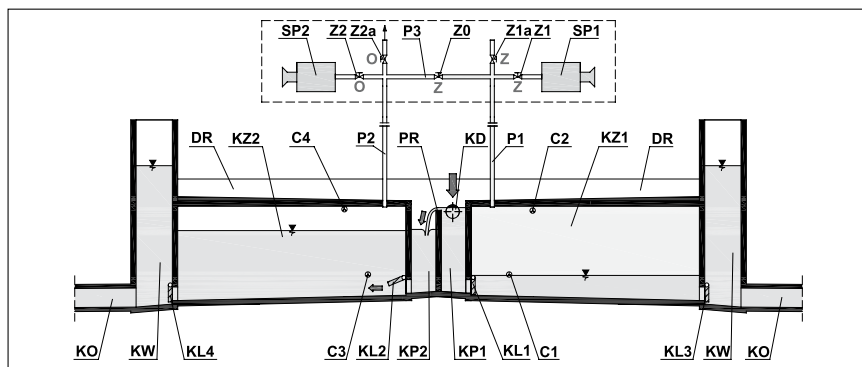
do komory wieżowej. Proces opróżniania pierwszej komory zbiorczej trwać będzie do czasu osiągnięcia poziomu dolnego czujnika. Po osiągnięciu tego poziomu zostaje wyłączona sprężarka i zamknięty odpowiedni zawór odcinający, dzięki czemu utrzymane zostanie sprężone



Rys. 3.
Schemat ideowy zbiornika retencyjno – przerzutowego: faza napełniania komory zbiorczej KZ1
Fig. 3. Schematic diagram of transfer reservoir – filling the first storage chamber and filling the flow-through chamber



Rys. 4.
Schemat ideowy zbiornika retencyjno – przerzutowego: rozpoczęcie procesu opróżniania komory zbiorczej KZ1 i napełniania komory zbiorczej KZ2
Fig. 3. Schematic diagram of transfer reservoir – the beginning of emptying the first storage chamber and filling the second storage chamber



Rys. 5.

Schemat ideowy zbiornika retencyjno – przerzutowego typu: całkowite opróżnienie komory zbiorczej KZ1 i dalsze napełnianie komory zbiorczej KZ2

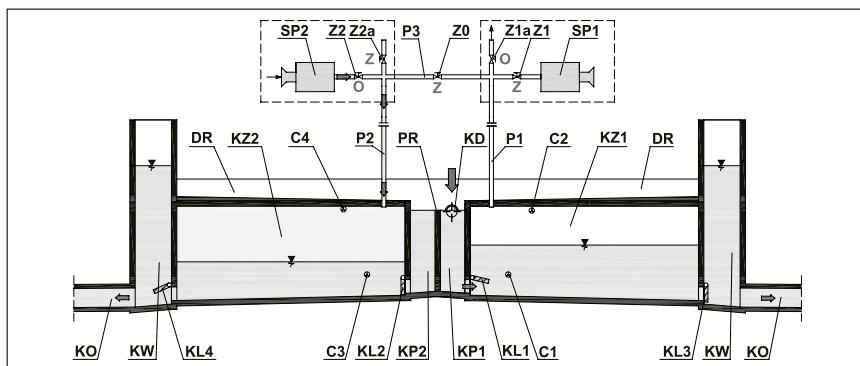
Fig. 5. Schematic diagram of transfer reservoir – complete emptying of the first storage chamber and filling the second storage chamber

powietrze (ciśnienie) w opróżnionej komorze (rys. 5).

Proces opróżniania pierwszej komory zbiorczej oraz proces napełniania drugiej komory zbiorczej rozpoczynane są równocześnie. Dopływająca w tym czasie ciecz do zbiornika poprzez przelew szczynowy napełnia komorę przelewową, a następnie drugą komorę zbiorczą. Napełnianie drugiej komory zbiorczej i komory przepływowej dokonywane jest jednocześnie.

Istotne jest dla prawidłowego działania zbiornika, by proces opróżniania w każdym przypadku jednej z komór zbiorczych zbiornika odpowiednio wyprzedzał proces napełniania drugiej komory. Całkowite wypełnienie cieczą drugiej komory zbiorczej jest możliwe dzięki utrzymaniu sprężonego powietrza (ciśnienia) pozostającego w pierwszej komorze zbiorczej po jej opróżnieniu (rys. 5).

Osiągnięcie całkowitego napełnienia w drugiej komorze zbiorczej spowoduje za pośrednictwem odpowiednich czujników i zaworów odcinających odcięcie tej komory od atmosfery. Umożliwi to również przepływ sprężonego powietrza



Rys. 7.

Schemat ideowy zbiornika retencyjno – przerzutowego: kontynuacja opróżniania komory zbiorczej KZ2 za pomocą sprężarki SP2 przy ponownym napełnianiu komory zbiorczej KZ1

Fig. 7. Schematic diagram of transfer reservoir – continuation of emptying the second storage chamber at the participation the air-compressor and repeated filling the first storage chamber

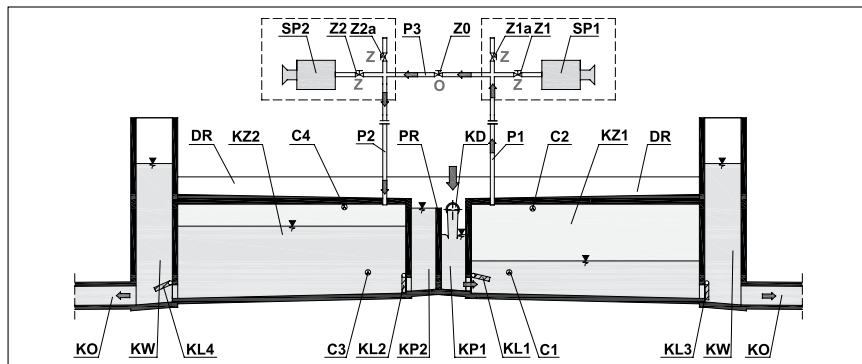
z pierwszej komory zbiorczej, które zostało zatrzymane po całkowitym jej opróżnieniu, do drugiej komory. Zapoczątkowany zostaje tym samym proces częściowego opróżnienia drugiej komory zbiorczej za pośrednictwem sprężonego powietrza, zatrzymanego w tej komorze – rozpoczyna się proces wyrównywania ciśnienia powietrza w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych. Wzrost ciśnienia powietrza w drugiej komorze zbior-

czej umożliwia tym samym przepływ cieczy z drugiej komory zbiorczej do komory wieżowej (rys. 6).

W dalszym etapie, dla całkowitego opróżnienia drugiej komory zbiorczej z cieczy, niezbędne jest włączenie sprężarki i odpowiednie sterowanie zaworami odcinającymi (rys. 7). Sprężarka opróżnia wówczas drugą komorę zbiorczą do czasu, gdy poziom zwierciadła cieczy zrówna się z położeniem dolnego czujnika. Po osiągnięciu tego poziomu zostaje wyłączona sprężarka i zamknięty odpowiedni zawór odcinający, dzięki czemu utrzymane zostanie sprężone powietrze (ciśnienie) w opróżnionej komorze (rys. 8).

Podczas pneumatycznego opróżniania drugiej komory zbiorczej ciecz dopływająca do zbiornika napełnia ponownie pierwszą komorę zbiorczą. Osiągnięcie stanu całkowitego napełnienia w pierwszej komorze zbiorczej spowoduje za pośrednictwem odpowiednich czujników i zaworów odcinających odcięcie jej od atmosfery i równocześnie nastąpi przepływ sprężonego powietrza z drugiej komory zbiorczej do komory pierwszej. Tak zapoczątkowany zostaje proces częściowego opróżniania komory zbiorczej poprzez wyrównywanie ciśnienia powietrza w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych (rys. 9).

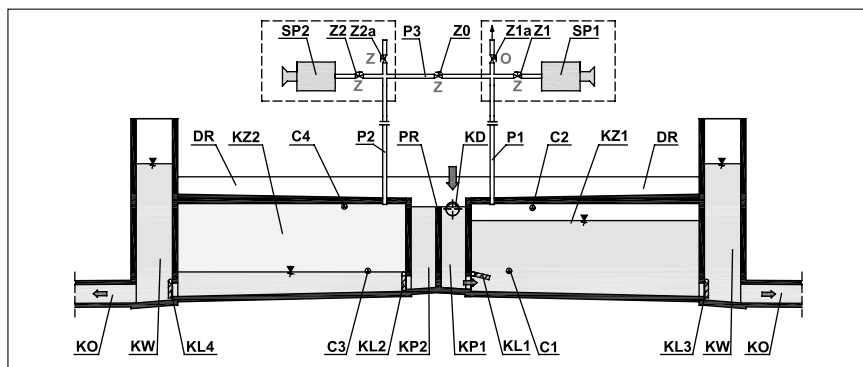
Wzrost ciśnienia powietrza w pierwszej komorze zbiorczej spowoduje tym samym przepływ cieczy z pierwszej komory zbiorczej do komory wieżowej (rys. 10). Po zakończeniu procesu wyrównywania ciśnienia powietrza zamkniętego w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych zbiornika, poprzez odpowiednie sterowanie zaworami odcinającymi, zostaje włączona sprężarka (rys. 10). Sprężarka opróżnia już tylko częściowo napełnioną pierwszą komorę zbiorczą do czasu, gdy zwierciadło cieczy zrówna się



Rys. 6.

Schemat ideowy zbiornika retencyjno – przerzutowego typu: opróżnianie komory zbiorczej KZ2 sprężonym powietrzem podczas wyrównywania jego ciśnienia w obydwu komorach zbiorczych przy równoczesnym napływie cieczy do komory KZ1

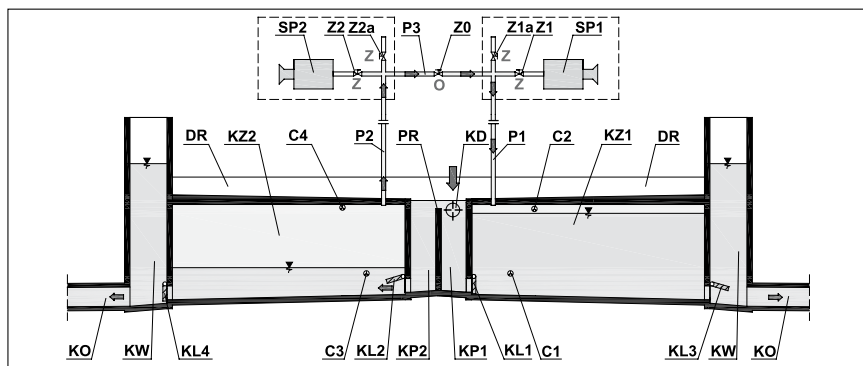
Fig. 6. Schematic diagram of transfer reservoir – the process of partial emptying of the second storage chamber by compressed air and filling the first storage chamber



Rys. 8.

Schemat ideowy zbiornika retencyjno – przerzutowego: stan całkowitego opróżnienia komory zbiorczej KZ2 i kontynuacja napełniania cieczą otwartą do atmosfery komory zbiorczej KZ1

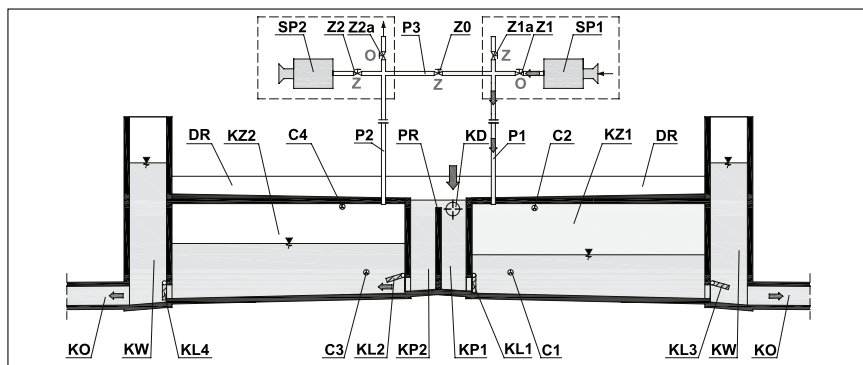
Fig. 8. Schematic diagram of transfer reservoir – complete emptying of the second storage chamber and continuation of filling the first storage chamber



Rys. 9.

Schemat ideowy zbiornika retencyjno – przerzutowego: opróżnianie komory zbiorczej KZ1 przez wyrównywanie ciśnienia powietrza w obydwu komorach zbiornika

Fig. 9. Schematic diagram of transfer reservoir – the process of the partial emptying of the first storage chamber through the balancing the air pressure in both separated from the atmosphere the storage chambers



Rys. 10.

Schemat ideowy zbiornika retencyjno – przerzutowego: kontynuacja opróżniania komory zbiorczej KZ1 przy pomocy sprężarki SP1 i ponowne napełnianie cieczą połączoną z atmosferą komory zbiorczej KZ2

Fig. 10. Schematic diagram of transfer reservoir – continuation of emptying the first storage chamber at the participation the air-compressor and repeated filling the second storage chamber

z poziomem dolnego czujnika. Podczas pneumatycznego opróżniania pierwszej komory zbiorczej następuje ponowne, równoczesne napełnianie cieczą drugiej komory zbiorczej.

W chwili osiągnięcia przez ciecz poziomu dolnego czujnika sprężarka zostaje wyłączona, przez co w pierwszej komorze zbiorczej ponownie zatrzymane zostaje sprężone powietrze (ciśnienie). Po całkowitym wypełnieniu cieczą drugiej komory

zbiorczej proces jej opróżniania, jak poprzednio, zostaje wznowiony. Takie naprzemienne napełnianie i opróżnianie komór zbiorczych zbiornika pozwala na przerzucenie dopływającej do niego cieczy do odbiornika wodnego. Jeżeli dopływ cieczy do zbiornika zaniknie, to można wówczas rozważyć dwa warianty zakończenia procesu jej przerzutu do odbiornika:

- w pierwszym wariantcie czujnik, umieszczony w dopływie do zbiornika, włączy

obie sprężarki i spowoduje całkowite opróżnienie obydwu komór zbiorczych, w drugim wariantcie częściowo jeszcze napełnione cieczą komory zbiorcze będą opróżnione grawitacyjnie dopiero po odpowiednim obniżeniu się poziomu napełnienia w cieku wodnym.

Efekty energooszczędne wynikające z wyrównania ciśnień sprężonego powietrza w procesie opróżniania komór zbiorczych zbiornika

Energooszczędność działania zbiornika uzyskiwana jest podczas procesu wyrównania ciśnienia powietrza w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych zbiornika. Badania [14, 15] wykazały, że wystąpić mogą dwa przypadki przebiegu tego procesu:

- gdy napływ cieczy do uprzednio opróżnionej komory zbiorczej nie będzie możliwy,
- gdy będzie następował napływ cieczy do uprzednio opróżnionej komory zbiorczej.

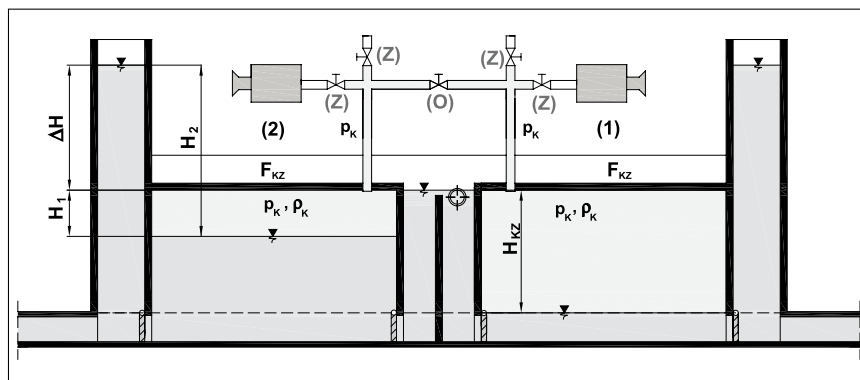
W opracowanym modelu matematycznym, przedstawionym w dalszej części artykułu, działania komór zbiorczych zbiornika podczas wyrównywania ciśnienia powietrza przyjęto następujące założenia:

- w procesie opróżniania komory zbiorczej zbiornika za pośrednictwem sprężonego powietrza prędkość opadania zwierciadła cieczy w komorze jest niewielka i zmiana objętości oraz ciśnienia powietrza następuje zgodnie z izotermicznym prawem Boyle'a – Mariotte'a [16];
- w rozwiązaniu konstrukcyjnym zbiornika przyjęto, że opróżnienie komory zbiorczej stanowi obniżenie w niej zwierciadła cieczy z maksymalnego położenia (strefa podstopowa komory) do rzędnej odpowiadającej górnym krawędziom otworów klapowych. W opisie matematycznym działania zbiornika przyjęto również następujące uproszczenia:
- w procesie opróżniania komór zbiorczych zbiornika położenie zwierciadła cieczy w komorze wieżowej pozostaje niezmiennie (stałe),
- przepływy cieczy przez zawory klapowe obliczane są dla otworów, które pozbawione są kłap, przy czym dla natężenia przepływu miarodajnego jako maksymalnego wymiarowane są „światła” tych otworów przy założeniu minimalnej różnicy położenia zwierciadeł cieczy przed i za otworem,
- dopływ cieczy do zbiornika podczas trwania procesu wyrównywania

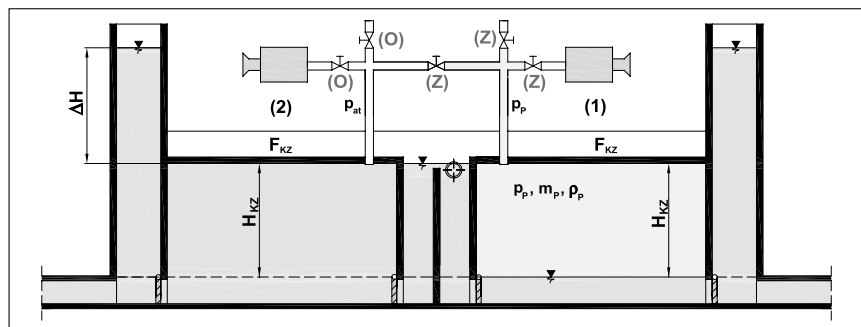
ciśnienia powietrza w komorach zbiorczych nie powoduje znaczącego spiętrzenia zwierciadła cieczy w dopływie do zbiornika i dlatego w obliczeniach przyjęte jest ono jako stałe.

I przypadek procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w komorach zbiornika

Przypadek, w którym napełnienie komory wieżowej jest takie ($\Delta H + H_1 \geq H_{KZ}$), że praktycznie uniemożliwia dopływ cieczy do uprzednio opróżnionej komory (rys. 11 i 12). W rozważanym przypadku komory zbiornika zostały przyjęte jako prostopadłościennie.



Rys. 12. Stan końcowy procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w komorach zbiorczych zbiornika dla warunku: $H_2 \geq H_{KZ}$
Fig. 12. Final state of the the balancing the air pressure process in the reservoirs storage chambers for $H_2 \geq H_{KZ}$



Rys. 11. Stan początkowy zaistniały po opróżnieniu komory (1) i przy całkowitym wypełnieniu komory (2), gdy napełnienie komory wieżowej jest o ΔH powyżej maksymalnego położenia zwierciadła cieczy w napełnionej komorze zbiornika
Fig. 11. The initial state occurred after emptying the chamber (1) and with complete filling of the chamber (2), when the filling of the tower chamber ΔH is above the maximum position surface of the liquid in the filled chamber of the transfer reservoir

Przyjęte oznaczenia:

- H_{KZ} – wysokość użytkowa komory zbiorczej, [m];
- H_{KW} – napełnienie komory wieżowej, [m];
- ΔH – położenie zwierciadła cieczy w komorze wieżowej ponad poziom maksymalnego napełnienia w komorze zbiorczej, [m];
- H_1 – wysokość sprężonego powietrza po wyrównaniu ciśnienia powietrza w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiornika, [m];
- F_{KZ} – pole powierzchni poziomego przekroju komory zbiorczej zbiornika, [m²];
- p_{at} – ciśnienie atmosferyczne, [Pa];
- p_p – początkowe ciśnienie sprężonego powietrza w komorach zbiorczych, [Pa];
- p_k – końcowe ciśnienie sprężonego powietrza w komorach zbiorczych, [Pa];
- ρ_0 – gęstość powietrza przy ciśnieniu atmosferycznym, [kg/m³];
- ρ_p – końcowa gęstość sprężonego powietrza, [kg/m³];
- ρ_k – końcowa gęstość sprężonego powietrza, [kg/m³];

- γ – ciężar właściwy retencjonowanej cieczy, [N/m³];
- m_p, m_k – masa powietrza początkowa i końcowa zamkniętego w komorach zbiorczych zbiornika, [kg];
- F_{KZ} – pole powierzchni poziomego przekroju komory zbiorczej zbiornika, [m²].

Ciśnienie powietrza w komorze (1) bezpośrednio po jej opróżnieniu wynosi:

$$p_p = p_{at} + (H_{KZ} + \Delta H)\gamma, \quad (1.1)$$

przy czym masa zamkniętego sprężonego w niej powietrza jest równa:

$$m_p = H_{KZ} F_{KZ} \rho_p. \quad (1.2)$$

Ponieważ z przemiany izotermicznej stanu gazu wynika związek:

$$\rho_p = \frac{\rho_0}{p_{at}} p_p, \quad (1.3)$$

to masa zamkniętego sprężonego powietrza w komorze (1) wyrażona może być następująco:

$$m_p = H_{KZ} F_{KZ} \frac{\rho_0}{p_{at}} p_p. \quad (1.4)$$

Po wyrównaniu ciśnienia powietrza w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiornika jego końcowa wartość ciśnienia powietrza wyniesie:

– według parametrów w komorze (1):

$$p_K = p_{at} + H_{KZ}\gamma; \quad (1.5)$$

– według parametrów w komorze (2):

$$p_K = p_{at} + (H_1 + \Delta H)\gamma. \quad (1.6)$$

Masa zamkniętego powietrza w obydwu komorach zbiornika jest wówczas równa:

$$\begin{aligned} m_k &= (H_{KZ} + H_1) F_{KZ} \rho_K = \\ &= (H_{KZ} + H_1) F_{KZ} \frac{\rho_0}{p_{at}} p_K. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Z niezmienności wartości tej masy na początku i na końcu procesu wyrównania ciśnienia powietrza ($m_p = m_k$) otrzymano:

$$H_{KZ} F_{KZ} \frac{\rho_0}{p_{at}} p_p = (H_{KZ} + H_1) F_{KZ} \frac{\rho_0}{p_{at}} p_K \quad (1.8)$$

$$p_p H_{KZ} = (H_{KZ} + H_1) p_K. \quad (1.8a)$$

Uwzględniając w równaniu (1.8a) wyrażenia (1.1) i (1.6) oraz po dokonaniu odpowiednich przekształceń:

$$\begin{aligned} [p_{at} + (H_{KZ} + \Delta H)\gamma] H_{KZ} = \\ (H_{KZ} + H_1)[p_{at} + (H_1 + \Delta H)\gamma], \end{aligned} \quad (1.9)$$

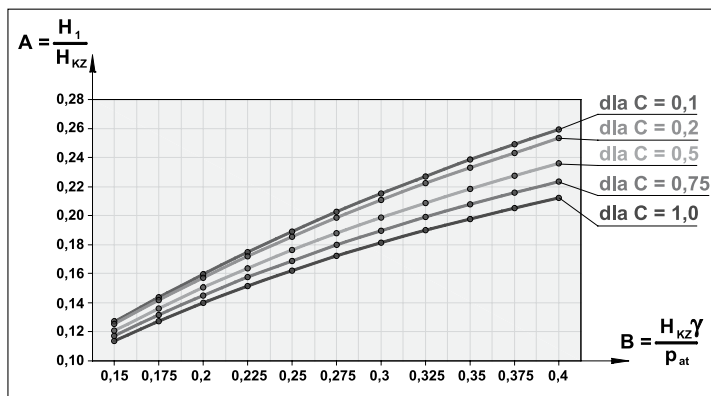
otrzymano następującą zależność:

$$\begin{aligned} \frac{p_{at}}{H_{KZ}\gamma} + \frac{\Delta H}{H_{KZ}} + 1 = \\ = \left(1 + \frac{H_1}{H_{KZ}}\right) \left(\frac{p_{at}}{H_{KZ}\gamma} + \frac{H_1}{H_{KZ}} + \frac{\Delta H}{H_{KZ}}\right). \end{aligned} \quad (1.10)$$

Przyjmując obecnie bezwymiarowe parametry:

$$A = \frac{H_1}{H_{KZ}}, \quad B = \frac{H_{KZ}\gamma}{p_{at}}, \quad C = \frac{\Delta H}{H_{KZ}}, \quad (1.11)$$

zależność (1.10) przyjmie kolejną postać:



Rys. 13. Graficzne przedstawienie równania (1.14) jako funkcji $A = f(B)$ dla różnych wartości parametru (C)
Fig. 13. Graphical representation of equation (1.14) as a function $A = f(B)$ for different values parameter (C)

$$p_K = p_{at} + H_3 \gamma; \quad (2.6)$$

Z porównania wzorów (2.5) i (2.6) wynika, że: $H_2 = H_3 = H_1 + \Delta H$

Masa zamkniętego powietrza sprężonego w obydwu komorach jest równa:

$$\begin{aligned} m_K &= (H_3 + H_1) F_{KZ} \rho_K = \\ &= (H_3 + H_1) F_{KZ} \frac{\rho_0}{p_{at}} p_K. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Z niezmienności wartości masy powietrza na początku i na końcu procesu

$$\frac{1}{B} + C + 1 = (1 + A) \left(\frac{1}{B} + A + C \right), \quad (1.12)$$

która po uporządkowaniu jest równaniem kwadratowym ze względu na parametr (A) :

$$A^2 + A \left(1 + \frac{1}{B} + C \right) - 1 = 0. \quad (1.13)$$

Rozwiązaniem powyższego równania kwadratowego jest wzór:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{B} + C \right) \\ &\left[\sqrt{1 + \frac{4}{\left(1 + \frac{1}{B} + C \right)^2}} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Graficzny obraz równania (1.14) jako funkcji $A = f(B)$ może być przedstawiony dla różnych wartości parametru (C) przy uwzględnieniu warunku początkowego, dla którego $\Delta H + H_1 \geq H_{KZ}$ (rys. 14).

II przypadek procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w komorach zbiornika

Przypadek, w którym napelnienie komory wieżowej jest wyższe o wartość $\Delta H > 0$ od maksymalnego położenia zwierciadła cieczy w komorach zbiornika, przy czym $\Delta H + H_1 < H_{KZ}$ (rys. 14 i 15). Komory zbiornika zostały przyjęte jak poprzednio jako prostopadłościennie, zatem ich przekrój poziomy jest stały i wynosi: F_{KZ} .

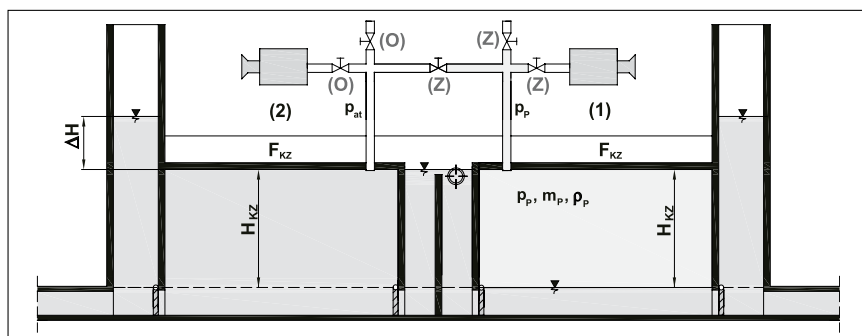
Ciśnienie powietrza w komorze (1) bezpośrednio po jej opróżnieniu wynosi:

$$p_P = p_{at} + (H_{KZ} + \Delta H) \gamma. \quad (2.1)$$

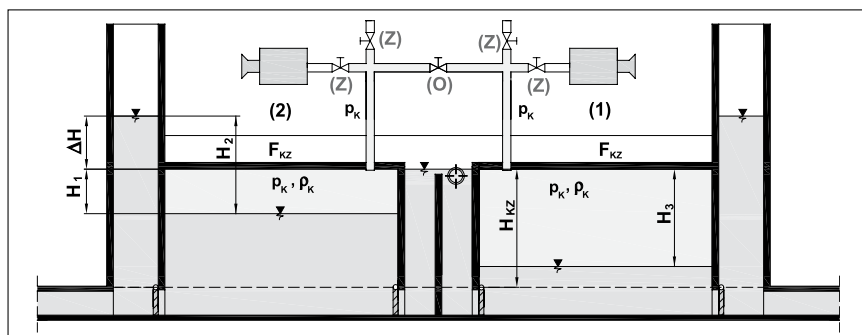
Natomiast masa zamkniętego w niej sprężonego powietrza jest równa:

$$m_P = H_{KZ} F_{KZ} \rho_P. \quad (2.2)$$

Uwzględniając w równaniu (2.2) związek wynikający z izotermicznej przemiany stanu powietrza:



Rys. 14. Stan początkowy zaistniały po opróżnieniu komory (1) i przy całkowitym wypełnieniu komory (2), gdy napelnienie komory wieżowej ΔH jest powyżej maksymalnego stanu napelnienia komory zbiornika
Fig. 14. The initial state occurred after emptying the chamber (1) and with complete filling of the chamber (2), when the filling of the tower chamber ΔH is above the maximum position surface of the liquid in the filled chamber of the transfer reservoir



Rys. 15. Stan końcowy procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w komorach zbiornika dla warunku: $H_2 < H_{KZ}$
Fig. 15. Final state of the the balancing the air pressure process in the reservoirs storage chambers for $H_2 < H_{KZ}$

$$\rho_P = \frac{\rho_0}{p_{at}} p_P, \quad (2.3)$$

otrzymano wzór określający wartość masy zamkniętego w komorze (1) powietrza:

$$m_P = H_{KZ} F_{KZ} \frac{\rho_0}{p_{at}} p_P. \quad (2.4)$$

Po wyrównaniu ciśnienia powietrza w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiornika, jego wartość końcowa wynosi:

– według parametrów w komorze (1):

$$p_K = p_{at} + H_2 \gamma; \quad (2.5)$$

– według parametrów w komorze (2):

wyrównania ciśnienia powietrza w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiornika, $m_P = m_K$, wynikają następujące związki:

$$H_{KZ} F_{KZ} \frac{\rho_0}{p_{at}} p_P = (H_3 + H_1) F_{KZ} \frac{\rho_0}{p_{at}} p_K. \quad (2.8)$$

$$p_P H_{KZ} = (H_3 + H_1) p_K. \quad (2.8a)$$

Po uwzględnieniu w równaniu (2.8a) związków określonych wzorami (2.1) i (2.6) i dokonaniu odpowiednich przekształceń:

$$\begin{aligned} [p_{at} + (H_{KZ} + \Delta H) \gamma] H_{KZ} = \\ = (H_3 + H_1) (p_{at} + H_3 \gamma), \end{aligned} \quad (2.9)$$

otrzymano następującą postać równania (2.8a):

$$H_{KZ} \left(\frac{p_{at}}{\gamma} + H_{KZ} + \Delta H \right) = \frac{H_3 p_{at}}{\gamma} + H_3^2 + \frac{H_1 p_{at}}{\gamma} + H_1 H_3. \quad (2.10)$$

Uwzględniając w równaniu (2.10), że $H_3 = H_1 + \Delta H$, otrzymano kolejną postać równania (2.8), w którym wyeliminowano parametr (H_3):

$$H_{KZ} \left(\frac{p_{at}}{\gamma} + H_{KZ} + \Delta H \right) = (H_1 + \Delta H)^2 + (H_1 + \Delta H) \left(\frac{p_{at}}{\gamma} + H_1 \right) + H_1 \frac{p_{at}}{\gamma}. \quad (2.11)$$

Dokonując odpowiednich przekształceń, ostatecznie równanie (2.11) można zapisać następująco:

$$\frac{p_{at}}{H_{KZ} \gamma} + 1 + \frac{\Delta}{H_{KZ}} = \frac{2H_1^2}{H_{KZ}^2} + \frac{3H_1 \Delta H}{H_{KZ}^2} + \frac{\Delta H^2}{H_{KZ}^2} + \frac{2H_1 p_{at}}{H_{KZ}^2 \gamma} + \frac{\Delta H p_{at}}{H_{KZ}^2 \gamma} \quad (2.12)$$

Przyjmując z kolei jak poprzednio bezwymiarowe parametry:

$$A = \frac{H_1}{H_{KZ}}, \quad B = \frac{H_{KZ} \gamma}{p_{at}}, \quad C = \frac{\Delta H}{H_{KZ}}, \quad (2.13)$$

i po uwzględnieniu ich w równaniu (2.12) otrzymano bezwymiarową postać tego równania:

$$\frac{1}{B} + 1 + C = 2A^2 + 3AC + C^2 + \frac{2}{B} A + \frac{C}{B}, \quad (2.14)$$

które po uporządkowaniu jest kwadratowym równaniem ze względu na parametr (A):

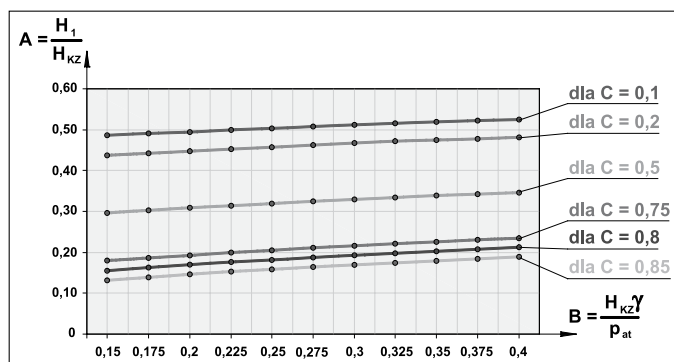
$$A^2 + A \left(\frac{3}{2} C + \frac{1}{B} \right) + \frac{C^2}{2} + \frac{1}{2} \frac{C}{B} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{B} + 1 + C \right) = 0 \quad (2.15)$$

Rozwiązaniem bezwymiarowego równania kwadratowego jest wzór:

$$A = \frac{1}{2B} \left(\frac{3}{2} CB + 1 \right) \pm \sqrt{1 + \frac{1+C-C^2+\frac{1-C}{B}}{2 \left(\frac{1}{2B} \right)^2 \left(\frac{3}{2} CB + 1 \right)^2} - 1} \quad (2.16)$$

Przedstawienie graficzne wzoru (2.16) jako funkcji $A = f(B)$ przy zadanej warto-

Rys. 16. Graficzne przedstawienie wzoru (2.16) jako funkcji $A = f(B)$ dla różnych wartości parametru (C)
Fig. 16. Graphical representation of equation (1.14) as a function $A = f(B)$ for different values parameter (C)



ści parametru (C) może być dokonane z uwzględnieniem warunku początkowego: $\Delta H + H_1 < H_{KZ}$ (rys. 17).

Jak już wcześniej wspomniano, badania empiryczne i modelowe [9, 15] na zbiorniku retencyjno – przerzutowym wykazały, że występują dwa przypadki przebiegu procesu wyrównywania ciśnienia powietrza, w którym komory zbiorcze zbiornika są odcięte od atmosfery:

- gdy napływ cieczy do uprzednio opróżnionej komory zbiorczej nie będzie możliwy,
- gdy będzie następował napływ cieczy do uprzednio opróżnionej komory zbiorczej.

O wystąpieniu pierwszego bądź drugiego przypadku decyduje wartość przewyższenia napełnienia komory wieżowej (ΔH) ponad maksymalny poziom napełnienia komory zbiorczej oraz sama wartość (H_{KZ}) jako użytkowa wysokość komory zbiorczej.

W pierwszym przypadku dla $C = \Delta H / H_{KZ} > 0,75$ dla różnych możliwych wartości $B = H_{KZ} / p_{at} \gamma$, gdy napływ cieczy do uprzednio opróżnionej komory zbiorczej nie będzie możliwy, efektywna wartość częściowego opróżnienia całkowicie napełnionej cieczą komory zbiorczej podczas procesu wyrównywania ciśnienia powietrza jest niewielka, bo stanowi nie więcej niż $A = H_1 / H_{KZ} \ 100\% < 22\%$ jej pojemności (rys. 13).

W przypadku drugim $0 < C = \Delta H / H_{KZ} < 0,75$ wyróżnione zostały trzy etapy przebiegu procesu wyrównywania ciśnienia powietrza zamkniętego w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych zbiornika, które ze względu na ograniczoną objętość artykułu nie zostały tu szczegółowo opisane:

- w pierwszym, krótkotrwałe opróżnianie komory zbiorczej następuje przy braku napływu cieczy do komory uprzednio opróżnionej. Jest to etap pod względem hydraulicznym identyczny z przypadkiem pierwszym;
- w drugim, gdy spadek ciśnienia rozprężanego powietrza w komorach

zbiorczych zbiornika umożliwi napływ cieczy do komory uprzednio opróżnionej, dynamika opróżniania komory wzrasta i kończy się hipotetycznie po uzyskaniu ciśnienia powietrza (p_w), przy którym następuje pierwsze zrównoważenie wysokości ciśnień na otworze odpływowym od strony komory wieżowej i komory zbiorczej. Tak zakończony zostałby ten proces, gdyby równocześnie ustał dopływ cieczy do zbiornika. Podczas trwania drugiego etapu napełnienie w komorze przepływowej zostaje na tyle obniżone, by zapewnić ono mogło napływ cieczy o określonym natężeniu do komory zbiorczej;

- w trzecim, kontynuowane jest opróżnianie komory zbiorczej na skutek ciągłego dopływu cieczy do zbiornika, który, zwiększając napełnienie w komorze przepływowej, wymusza dalszy napływ cieczy do komory uprzednio opróżnionej. W układzie, w którym komory zbiorcze są odcięte od atmosfery przyrost napełnienia w komorze obecnie napełnianej spręża zamknięte w nich powietrze, wymuszając dalszy odpływ cieczy z komory opróżnianej. Etap trzeci zakończony zostaje w chwili, gdy napełnienie komory przepływowej osiągnie założoną wartość maksymalną, która nie zostaje zwiększona mimo dalszego dopływu cieczy do zbiornika. W praktyce zakończenie trzeciego etapu uruchamia sprężarkę w celu dokończenia opróżniania komory zbiorczej, natomiast komora napełniana przez otwarcie odpowiedniego zaworu, zostaje połączona z atmosferą w celu zapewnienia niczym nie uwarunkowanej kontynuacji jej wypełniania cieczą.

W przypadku drugim efektywna wartość częściowego opróżnienia komory zbiorczej zawiera się w granicach $22 < A = H_1 / H_{KZ} \ 100\% < 52\%$ (rys. 16). Gdy natomiast $C = \Delta H / H_{KZ} = 0$, to nie występuje etap pierwszy w procesie wyrównywania ciśnienia powietrza zamkniętego

w obydwu odciętych od atmosfery komorach zbiorczych, ponieważ napływ cieczy do komory uprzednio opróżnionej zaczyna się z chwilą rozpoczęcia tego procesu.

Podsumowanie

Przedstawiony w niniejszym artykule zbiornik retencyjno – przerzutowy cieczy stanowi alternatywne rozwiązanie w stosunku do tradycyjnych przepompowni. Zapewnia on, oczekiwaną efektywność i niezawodność w działaniu. Jest rozwiązaniem prostym, które umożliwia właściwe jego wkomponowanie w otoczenie naturalnego środowiska. Pozwala on na odprowadzenie wód pochodzących z opadów atmosferycznych do odbiornika, niezależnie od chwilowego stanu jego napełnienia. Rozwiązanie tego typu może również znaleźć zastosowanie w przerzucie ścieków do zlewni o wyższym położeniu wysokościowym, a także stanowić zbiorczy zbiornik przed oczyszczalnią, z którego ścieki odprowadzane będą do technologicznego procesu ich oczyszczania.

Energooszczędne działanie zbiornika retencyjno – przerzutowego uzależnione jest od aktualnego stanu napełnienia w odbiorniku (rzece), które odpowiada położeniu zwierciadła cieczy w jego komorze wieżowej. Niezależnie od tego, czy rozważany jest zbiornik w wersji energooszczędnej względnie czy jest to zbiornik w wersji podstawowej, zużycie energii elektrycznej wzrasta wraz z poziomem napełnienia komory wieżowej.

Prawidłowe działanie zbiornika retencyjno – przerzutowego wymaga zapewnienia takiej kolejności działania, by najpierw następowało pełne opróżnienie jednej komory zbiorczej, a dopiero później całkowite napełnienie cieczą drugiej komory. Stosownie do tego warunku w opróżnionej komorze utrzymywane jest sprężone powietrze do chwili całkowitego napełnie-

nia komory drugiej i rozpoczęcia procesu wyrównywania ciśnienia powietrza w obydwu komorach zbiorczych zbiornika.

Dobór technicznych parametrów sprzężarek powietrza przewidzianych dla każdej prostopadłościowej komory zbiorczej zbiornika powinien zapewniać taką wydajność objętościową wtłaczanego powietrza do komory oraz taki przyrost jego ciśnienia, by zagwarantowany był odpływ cieczy z komory zbiorczej do komory wieżowej i dalej do odbiornika wodnego o zadanym natężeniu nie mniejszym od wartości dopływu miarodajnego.

Z przeprowadzonych badań wynika również to, że potrzeba zapewnienia dodatkowej pojemności retencyjnej w zbiorniku, która akumulowałaby dopływ cieczy do zbiornika wówczas, gdy nie będzie możliwe przyjęcie tego dopływu przez komory zbiorcze, jest uzasadniona jedynie w tych przypadkach, gdy podczas wyrównywania ciśnienia powietrza w obydwu komorach napływ cieczy do uprzednio opróżnionej komory nie będzie możliwy.

Zastosowanie zbiornika w praktyce wymaga dokładnego przeanalizowania danych o zlewni, sieci kanalizacyjnej, urządzeniach i obiektach z nią współdziałających, aby na ich podstawie można było uzyskać minimalizację kosztów poniesionych na realizację rozważanej inwestycji.

Praca naukowa finansowana w ramach projektu badawczego BS-PB-400/301/22

LITERATURA

- [1] Edel R., Odwodnienie dróg, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2017;
- [2] Geiger W., Dreiseitl H.: Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych, Warszawa, 1999.
- [3] Kołowski A.: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów, Tom 1, Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Warszawa 2015

- [4] Królikowska J., Królikowski A.: Wody opadowe. Odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie i wykorzystanie, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2019
- [5] Słysz D.: Zrównoważone systemy odwodnienia miast, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2013
- [6] Szruba M.: Odwodnienie i zagospodarowanie wód opadowych w miastach, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Kraków 2019
- [7] Wojciechowska M., Gajewska M., Żurkowska N., Surówka M., Obarska-Pempkowiak H.: Zrównoważone systemy gospodarowania wodą deszczową, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2015
- [8] Gancarz J., Wartalska K., Kaźmierczak B.: Modelowanie działania kanalizacji deszczowej ze zbiornikiem retencyjnym, Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska, Tom 6, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015
- [9] Malmur R., Kisiel A.: Energooszczędny zbiornik przerzutowy ścieków opadowych – GEMINUS – ET, Biuletyn Urzędu Patentowego UP P 373875, Warszawa 23 marzec 2005.
- [10] Kisiel A.: Zbiornik przerzutowy ścieków opadowych – GEMINUS – T, Biuletyn Urzędu Patentowego UP P 331776, Warszawa 03 marzec 1999
- [11] Kisiel A.: Zbiornik przerzutowy ścieków opadowych – PLUVIUS – P, Biuletyn Urzędu Patentowego UP RP 190004, Warszawa 14 październik 2005
- [12] Łomotowski J.: Rain water and extreme events. Monograph, Seidel-Przywecki, Warszawa, Poland 2011
- [13] Kaźmierczak B., Wdowikowski M., Gwoździez-Mazur J.: Trends in daily changes of precipitation on the example of Wrocław. *Ekonomia i Środowisko*, 2019, vol. 68, nr 1, s. 142-151, DOI:10.34659/b4d0-v433
- [14] Malmur R., Mrowiec M.: Zbiornik retencyjno-przerzutowy jako system odprowadzania wody opadowej, *Inżynieria Ekologiczna*, Vol. 48, June 2016, p. 153-160, DOI: 10.12912/23920629/63286
- [15] Malmur R.: Transfer Reservoir as a New Solution for Transfer of Stormwater to Water Receivers. *E3S Web of Conferences*, 22, 2017, DOI: 10.1051/e3sconf/201911600049
- [16] Błaszczyk P.: Metody obliczania natężeń przepływów ścieków opadowych miarodajnych do wymiarowania kanałów, *Ochrona Środowiska* nr 3 – 4, 1988