

Czesław GRABARCZYK

Warszawa

PRZEGLĄD I ANALIZA PORÓWNAWCZA KONSTRUKCJI FILTRÓW GRAWITACYJNYCH

A SURVEY AND COMPARATIVE ANALYSIS OF GRAVITATION FILTERS CONSTRUCTION

A description of structure, equipment and hydraulic operating conditions as well as comparative analysis of five gravitation filters have been presented. A particular attention was paid to adjustment properties of the discussed options. The report presents the specification of general recommendations of American technical committee for filtration [1].

1. Wprowadzenie

Przedmiotem referatu będzie przedstawienie kilku wariantów budowy, koniecznego wyposażenia i zasad działania filtrów do uzdatniania wody. Zakres rozważań zostanie zawężony do *klasycznych filtrów grawitacyjnych*. Uzasadnieniem wyboru takiego rodzaju filtrów do omawiania jest to, że warunki przepływu wody przez filtry grawitacyjne są bardziej złożone niż przez filtry ciśnieniowe, oraz występuje większa ilość wariantów tych warunków, które są konsekwencją modyfikowania konstrukcji.

Wyposażenie filtra obejmuje *instalację układu* doprowadzania wody surowej nad złożę i wyprowadzania wody z płukania złoża; *układ instalacji rurowych* do wyprowadzania filtratu spod płyty drenażowej; *armaturę operacyjną*, która służy do przestawiania układu hydraulicznego filtra ze stanu filtrowania na płukanie i odwrotnie (stany zaworów zależą od kolejnych *etapów cyklu filtracyjnego*); elektryczno-elektroniczny *układ automatycznego sterowania* stanem (zamknięty – otwarty) armatury operacyjnej, wyposażony w *elektroniczny programowalny sterownik*. Dla różnych *układów regulacji*, będą analizowane *4 warianty hydraulicznych warunków filtrowania wody*.

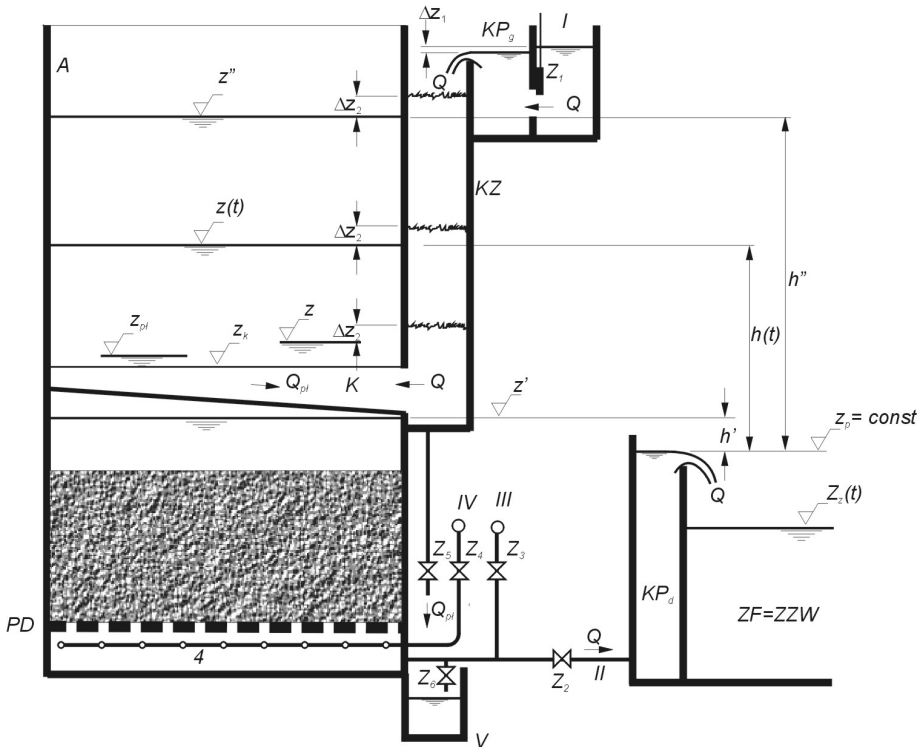
Referat przedstawia konkretyzację ogólnych zaleceń amerykańskiego komitetu technicznego ds. filtrowania [1]. W związku z tym ma techniczny charakter edukacyjny oraz porządkujący i pogłębiający wiedzę techniczną, w zakresie publikacji [6,7,8].

2. Pojęcia podstawowe oraz klasyfikacja filtrów

W konwencjonalnych otwartych filtrach grawitacyjnych, np. jak na rys. 1, występują:

- konstrukcja *hydraulicznego układu doprowadzania wody surowej*, składająca się z: magistralnego koryta zasilania I z zasuwą Z_1 , indywidualnej górnej komory przelewowej KP_g i indywidualnej komory zasilania KZ ;

- koryto K do wprowadzania wody surowej nad złożę i wyprowadzania wody z płukania złoża;
- zbiornik filtratu ZF, który spełnia rolę zbiornika wyrównawczo-zapasowego ZWZ; które z reguły są elementami składowymi szczelnej konstrukcji betonowej.



Rys. 1. Schemat układu filtra zwyczajnego – bez regulacji

Fig. 1. Diagram of ordinary filter system with no adjustment

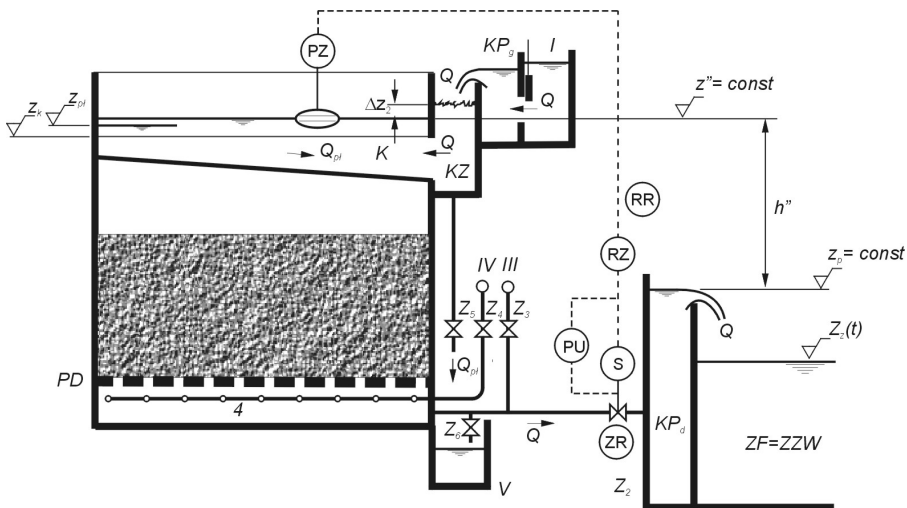
Najczęściej do magistralnego kanału I doprowadzającego wodę surową równolegle podłączonych jest szereg jednakowych filtrów, z których filtrat wyprowadzany jest do wspólnego zbiornika. W związku z tym, możliwe są następujące warianty:

- ♦ równomierny rozrząd wody z kanału I do poszczególnych filtrów jest ustalany ręcznie zasuwą Z_1 przy pomocy przelewu pomiarowego w górnej komorze przelewowej KP_g – jak na rys. 1 i 3;
- ♦ bez równomiernego rozrządu wody do poszczególnych filtrów, tzn. kiedy woda z kanału I przez otwór bez zasuwy wprowadzana jest bezpośrednio do komory zasilania KZ – rys. 2 i 4;
- ♦ filtrat jest wprowadzany do wspólnego zbiornika wyrównawczo-zapasowego ZWZ pod zwierciadło na zmiennej wysokości $z_z(t)$ – jak na rys. 2;

- ♦ filtrat jest wprowadzany do zbiornika wyrównawczo-zapowego ZWZ przez dolną komorę przelewową KP_d pod zwierciadło na stałej wysokości $z_p = \text{const}$. – jak na rys. 1, 3 i 4.

W zależności od budowy i zasady działania układu regulacji oraz rodzaju rozrządu wody do poszczególnych filtrów z magistralnego kanału zasilającego i sposobu wprowadzania filtratu do zbiornika, w punkcie 6.2.3 na podstawie odpowiedniej analizy zostanie przedstawione uzasadnienie, że możliwe są cztery *podstawowe rodzaje hydraulicznych warunków filtrowania* [1]:

1. zwyczajny układ filtra – bez regulacji, ze stałym przepływem $Q = \text{const}$ i podnoszącym się poziomem $z(t)$ zwierciadła wody nad złożem – rys. 1;
2. z indywidualną regulacją utrzymującą stałą przepustowość $Q = \text{const}$ i stałą wysokość zwierciadła wody $z = \text{const}$ nad złożem – rys. 2;
3. z indywidualną regulacją utrzymującą stałą wysokość zwierciadła wody $z = \text{const}$ nad złożem, przy malejącej przepustowości $Q(t)$ przez złożo – rys. 3;
4. bez automatycznej regulacji – z malejącą przepustowością $Q(t)$ i zmienną wysokością zwierciadła $z(t)$ nad złożem, bez równomiernego rozdziału wody na poszczególne filtry – rys. 4.



Rys. 2. Schemat układu filtra z regulacją utrzymującą stałą przepustowość Q i stałą wysokość $z'' = \text{const}$ zwierciadła wody nad złożem – wersja 1.

Fig. 2. Diagram of filter system with adjustment to maintain constant capacity Q and constant height z'' of water level above bed – version 1.

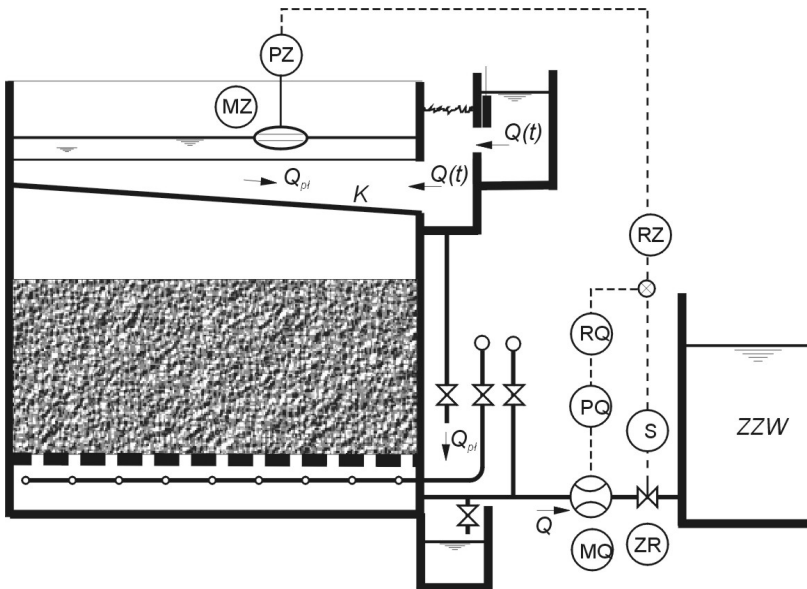
Głównym przedmiotem rozważań w punkcie 3, będzie analiza alternatywnych układów regulacji filtrów, w warunkach współdziałania baterii N jednakowych filtrów grawitacyjnych, zasilanych z jednego magistralnego kanału I i sprowadzających filtrat do wspólnego zbiornika ZF, który najczęściej spełnia rolę zbiornika wyrównawczo zapowego ZWZ stacji.

3. Ogólny opis budowy, wyposażenia i zasad działania

Można zauważyć, że wszystkie wyżej wymienione rodzaje filtrów, które będą kolejno omawiane charakteryzują się pewnymi wspólnymi cechami w zakresie budowy, wyposażenia i zasad działania. Poniższa prezentacja wspólnych cech będzie odnoszona do rys. 1 ÷ 4.

Skrzynia A, przeznaczona do umieszczenia złoża filtracyjnego, zalewanego filtrowaną wodą, najczęściej jest wykonana ze szczelnej konstrukcji betonowej. Złoże filtracyjne spoczywa na płycie drenażowej PD, z odpowiednią ilością otworów, w które wmontowane są tzw. *dysze filtracyjne* DF, przeznaczone do przepuszczania tylko filtratu i zatrzymywania ziaren złoża. W związku z tym, boczne ściany głowic dysz są nacięte dużą ilością szczelin o szerokości mniejszej od najdrobniejszych frakcji ziaren złoża. Filtrat z komory pod rusztowej wyprowadzany jest rurą 2 do komory przelewowej KP_d zbiornika ZF filtratu lub bezpośrednio do zbiornika ZF (jak na rys. 2).

Na wysokości z_k usytuowane są poziome krawędzie cienkościennego kanału K z nachylonym dnem (jak na rys.1), wmontowanego wyższym końcem w otwór w ścianie pojemnika A. Kanał K, z poziomymi krawędziami, jest przeznaczony do odprowadzania wody z płukania złoża filtracyjnego, której zwierciadło znajduje się na wysokości z_{pl} , oraz do równomiernego rozprowadzania wody surowej nad złożo, wprowadzanej przez otwór w ścianie komory zasilania KZ. Przez krawędzie woda przelewa się z kanału do przestrzeni nad złożem podczas filtrowania wody lub z tej przestrzeni do kanału podczas płukania złoża filtracyjnego.

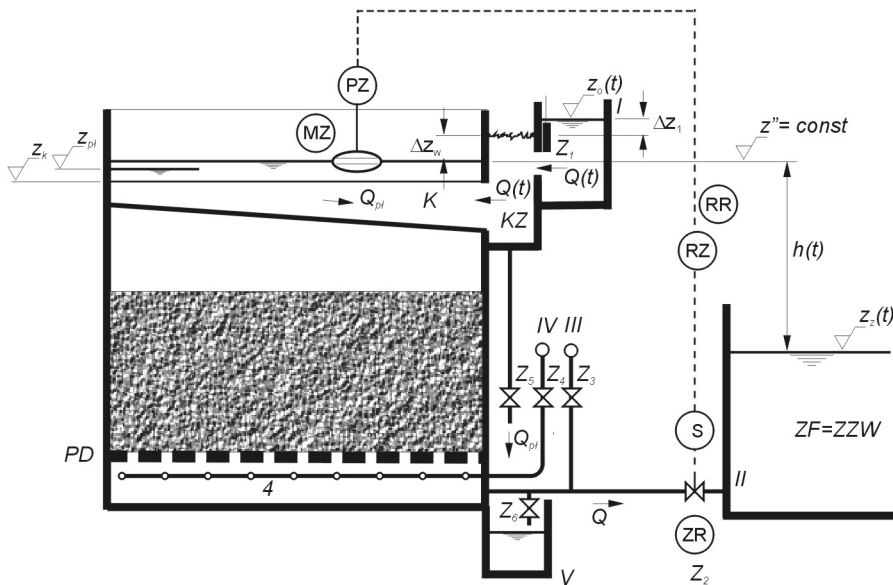


Rys. 3. Schemat układu filtra z regulacją utrzymującą stałą przepustowość Q i stałą wysokość z'' zwierciadła wody nad złożem – wersja 2.

Fig. 3. Diagram of filter system with adjustment to maintain constant capacity Q and constant height z'' of water level above bed – verion 2.

W związku z tak określoną dwojaką rolą koryta K, do skrzyni A dobudowana jest komora zasilania KZ, do której woda surowa z magistralnego kanału I wprowadzana jest przez górną indywidualną górną komorę przelewową KP_g – jak na rys. 1 i 3. Przelew w KP_g spełnia rolę *przelewu pomiarowego*, do ustalania żądanego dopływu Q przy pomocy zasuw Z_1 . Stan otwarcia zasuw, przy którym występuje żądany przepływ Q , ograniczony jest odpowiednią *blokadą*, uniemożliwiającą dalsze otwieranie. Gdy filtr jest przestawiany na płukanie złoza zasuw Z_1 jest zamykana. Oznacza to, że Z_1 spełnia dwie role: zasuw *regulacyjnej* do ustalania żądanego dopływu Q oraz zasuw *operacyjnej* do przestawiania filtra ze stanu filtrowania na płukanie i odwrotnie.

Tak skonstruowany układ hydrauliczny zasilania umożliwi równomierny rozrząd wody z magistralnego kanału zasilania I do poszczególnych filtrów – ze stałym dopływem $Q = \text{const}$.



Rys. 4. Schemat układu filtra z regulacją utrzymującą stałą wysokość z'' zwierciadła wody nad złożem, przy zmiennej przepustowości $Q(t)$

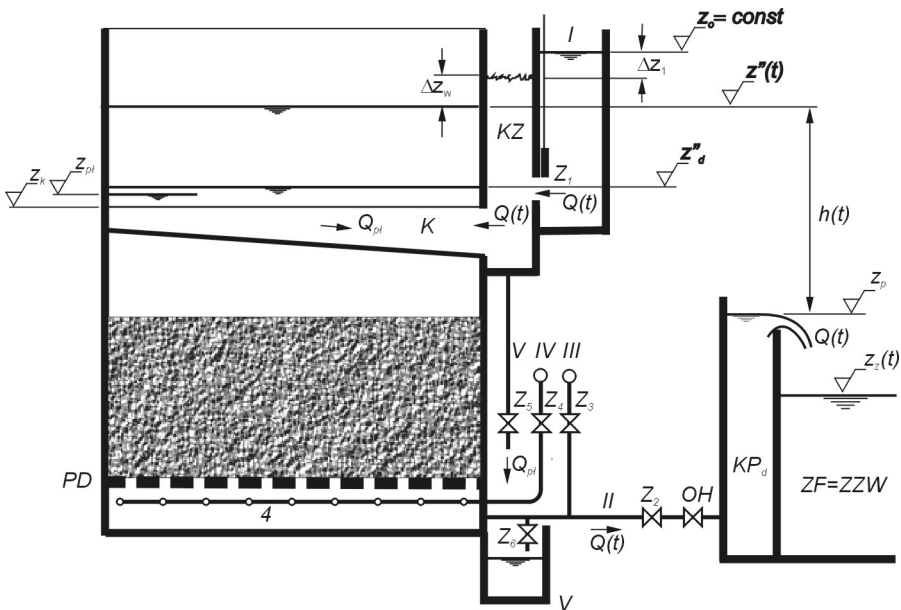
Fig. 4. Diagram of filter system with adjustment to maintain constant z'' , with varied capacity $Q(t)$

Złoże filtracyjne, dla zadanej jakości wody surowej i wymaganej przepustowości Q , projektowane jest wg zasad przedstawionych w [10] (rozdział 2, 4 i 5). Najniższe dopuszczalne usytuowanie zwierciadła wody z_0 nad zwierciadłem w chwili początkowej $t = 0$ procesu filtrowania, uniemożliwiające wystąpienie w złożu stref podciśnienia.

Dla znanych parametrów złoza i założonej procedury płukania, wg zasad przedstawionych w [10], wyznaczana jest maksymalna ekspansja e płukanego złoza oraz intensywność strumienia płukania Q_{pl} . Dla wyznaczonej ekspansji e zakłada się rzędną z_k krawędzi przelewu w K, uniemożliwiającą wynoszenie ziaren fluidalnego złoza. Rzędna zwier-

ciadła wody nad krawędzią z_{pl} można obliczyć dla zdanej wartości Q_{pl} , wykorzystując odpowiednią zależność Q_{pl} od $(z_{pl} - z_k)$ dla szerokiego przelewu prostokątnego.

Do odprowadzania strumienia Q_{pl} wody z płukania złoża filtracyjnego służy kanał K, z którego woda – przez komorę KZ i rurę spustową 5 – spływa do magistralnego kanału V, sprowadzającego ściek grawitacyjnie do osadnika. Korytem K przepływa strumień zbierający przelewającą się wodę wg liniowo rosnącej zależności $Q(x)$ w kierunku przepływu. Dlatego głębokość strumienia wzdłuż koryta jest liniowo rosnącą funkcją $h(x)$. W związku z tym należy obliczyć odpowiednie nachylenie dna koryta zapewniające odpływ strumienia Q_{pl} . Ponieważ krawędź koryta spełnia rolę krawędzi przelewu przejmującego wodę z płukanego złoża w stanie fluidalnym, z zaprojektowaną ekspansją e , rzędna krawędzi z_k musi być tak zaprojektowana, aby przelew przejmował tylko wodę – pozostawiając ziarenka złoża.



Rys. 5. Schemat układu filtra bez indywidualnej regulacji, z malejącą prędkością filtrowania $Q(t)$

Fig. 5. Diagram of filter system with no individual adjustment, with slowing down filtration $Q(t)$

Po zakończeniu procesu płukania złoża, zwierciadło wody nad złożem ustala się na wysokości z_k , od której rozpoczyna się proces filtrowania wody surowej. Wobec tego, po przestawieniu zaworów operacyjnych ze stanu płukania na dopłukiwanie, a następnie na filtrowanie – wg poniższej tabelki – strumień Q wody surowej, wprowadzanej z komory zasilania KZ, przez krawędź przelewową koryta K spowoduje początkowy przepływ wody przez czyste złożo, tzn. gdy koncentracja osadów $\sigma = 0$, przy którym zwierciadło wody nad złożem ustali się na początkowej wysokości z' . Należy sprawdzić czy spełniony jest warunek $z' > z_0$.

Dla znanych już parametrów czystego złoża filtracyjnego (d_c , ε , φ , A , L) oraz żądanej przepustowości Q , wg zasad przedstawionych w [10], należy wyznaczyć najniższe dopuszczalne położenie z' zwierciadła wody dla chwili $t = 0$. Różnica rzędnych $z' - z_p = h'$ jest naporem hydraulicznym przepływu Q przez układ filtrujący, określony równaniem

$$z' - z_p = h_o + h_d + h_2 = 144 \frac{\mu}{\gamma} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \left(\frac{\varphi}{d}\right)^2 L \frac{Q}{A} + \zeta_d \left(\frac{Q}{N}\right)^2 + (\Sigma \zeta_2) \frac{4Q^2}{\pi d_2^2} = S_{f_0} Q + S_d Q^2 + S_2 Q^2 \quad (1)$$

gdzie

- Q – przepustowość filtra, określona splotem z KP_g ;
- z_p – rzędna dolnego przelewu w KP_d , która jest wielkością projektowaną lub wynikającą z warunków eksploatacyjnych istniejącego filtra;
- ε , φ – współczynniki porowatości złoża filtracyjnego i kształtu ziaren [10];
- h_o , h_d , h_2 – straty hydrauliczne, odpowiednio: czystego złoża filtracyjnego (obliczane wg wzoru *Kozeny-Carmana* [10], dysz filtracyjnych i rury 2 [11];
- S_{f_0} , S_d , S_2 – oporności, odpowiednio j.w.;

Wartość prawej strony równania (1) może być obliczona. Wobec tego, w (1) jedyną wielkością nieznaną jest poszukiwana rzędna z' . Mogą wystąpić dwa przypadki $z' > z_k$ lub $z' < z_k$.

W okresie filtrowania, komora KZ zapewnia uspokojenie wzburzonej wody pod wpływem splotu z przelewu w KP_g . *Wprowadzenie uspokojonego strumienia Q przez koryto K i równomierne rozprowadzenie wody nad złożem*, minimalizując *niebezpieczeństwo rozmywania górnej warstwy złoża*.

Ponieważ zbiornik filtratu ZF z reguły spełnia rolę zbiornika wyrównawczo-zapasowego ZWZ, wysokość zwierciadła w tym zbiorniku jest zmienna $z_z(t)$. W celu uniezależnienia hydraulicznych warunków filtrowania od zmiennej wysokości zwierciadła $z_z(t)$, do zbiornika ZF filtrat wprowadzany jest przez indywidualną *dolną* komorę przelewową KP_d . Także z magistralnego kanału zasilania I woda surowa doprowadzana jest do filtra przez *górną* komorę przelewową KP_g . *Istnienie górnego i dolnego przelewu zapewnia stałe natężenie przepływu Q przez filtr, niezależnie od stopnia kolmatacji złoża, pod warunkiem że przelew nie zostanie zatopiony*. Z górnego przelewu woda splota swobodnym strumieniem do komory KZ z malejącej wysokości, w zależności od wzrastającego stopnia kolmatacji złoża. Gdy złożo jest czyste, tzn. gdy kumulacja zawiesin w złożu $\sigma = 0$, złożo pokryte jest płytką warstwą wody.

Woda do płukania doprowadzana jest z ciśnieniowego rurociągu magistralnego III, skąd rurą rozdzielczą wprowadzana jest do przestrzeni pod płytą rusztową. Natomiast, powietrze do płukania złoża, z ciśnieniowej rury magistralnej IV wprowadzane jest do przestrzeni pod rusztowej, gdzie równomiernie rozprowadzane jest układem 4 perforowanych rur rozrządowych.

Zawory (przepustnice) Z_1 , Z_2 , ..., Z_6 spełniają rolę *zaworów operacyjnych*, do przedstawiania filtra na odpowiednie etapy cyklu filtracyjnego: filtrowania, płukania i dopłukiwania. Stany poszczególnych zaworów, zamknięty – otwarty, w poszczególnych etapach cyklu filtracyjnego, są zestawione w części pogrubionej tablicy. Okresowo, dla celów remontowych oraz konserwacyjnych, zachodzi potrzeba odwodnienia filtra. Zalewanie odwodnionego filtra musi odbywać się *od dołu, w celu odpowietrzenia ze złoża filtracyjnego*, z zastosowaniem zaworu Z_7 . Stany wszystkich zaworów dla przeprowadzenia procesu odwadniania i zalewania filtra - także wg tablicy.

etapy cyklu filtrac-go:	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇
filtrowania	○	○	●	●	●	●	●
plukania złoza	●	●	○	○	○	○	○
dopłukiwania złoza	○	●	●	●	●	○	●
odwadniania filtra	●	●	●	●	○	○	●
zalewania filtra	●	●	●	●	●	●	○

gdzie: ○ - otwarty, ● - zamknięty

Zawory te są wyposażone w elektryczne napędy, przystosowane do *zcentralizowanego automatycznego sterowania* przestawiania filtra na kolejne etapy cyklu filtracyjnego.

4. Ogólna analiza prędkości filtrowania – 4 rodzaje filtrów

Jednym z kryteriów określających długość cyklu filtrowania jest dopuszczalny przyrost oporów hydraulicznych złoza $h_{z \text{ dop}}$, wywołany procesem kolmatacji złoza filtracyjnego. Wg wzoru Ivesa [10], *przebieg funkcji oporów hydraulicznych złoza $h_z(t)$ zależy od stężenia zawiesin C_o w wodzie surowej, własności fizycznych i wielkości ziaren oraz od intensywności filtrowania $q = Q/A = w_f$* . W zależności od hydraulicznych warunków doprowadzania wody do filtra i jej wyprowadzania z filtra, na skutek stopniowej kolmatacji złoza w procesie filtrowania, opory hydrauliczne h_z i prędkość filtrowania w_f są zmienne w czasie. W związku z tym może zachodzić potrzeba regulacji warunków przepływu wody przez złoże. Najczęściej regulacji podlega prędkość filtrowania w_f . Ponieważ istnieje kilka sposobów regulacji tej wielkości, zachodzi potrzeba przeprowadzenia ogólnej analizy hydraulicznych warunków przepływu przez filtr, w celu wyznaczenia odpowiednich zależności funkcyjnych oraz określenia technologicznych własności (zalet i wad) poszczególnych metod regulacji.

W analizie przedstawionej poniżej zostaną wykorzystane wyniki długotrwałych i wielokrotnie powtarzanych badań kontrolnych, które wykazały *wpływ metod regulacji prędkości filtrowania na jakość filtratu*. Ponieważ jakość filtratu jest głównym kryterium oceny działania filtrów, to ogólna analiza hydraulicznych warunków dla różnych wariantów układów filtrów jest uzasadniona, gdyż może być przesłanką do projektowania i modelowania układów filtrów.

Przepływ przez złoże filtracyjne Q wywołuje straty hydrauliczne h_z , które dla przypadku przepływu laminarnego [10] wyrażone są sumą:

$$h_z = h_o + h_k = 144 \frac{\mu (1 - \varepsilon)^2}{\gamma \varepsilon^3} \left(\frac{\varphi}{d} \right)^2 L \frac{Q}{A} + k C_o \frac{Q}{A} t = S_o Q + S_k(t) Q = S_z(t) Q \quad (2)$$

gdzie

h_o – straty hydrauliczne złoza czystego, określane wzorem *Kozeny-Carmana*; spełniają warunek $h_o = \text{const}$;

h_k – straty hydrauliczne złoza spowodowane kolmatacją; są rosnącą funkcją czasu $h_k(t)$;

S_o, S_k, S_z – oporności złoza filtracyjnego, odpowiednio – czystego, zakolmatowanego i ogólna; definiowane wzorami

$$S_o = 144 \frac{\mu (1 - \varepsilon)^2}{\gamma \varepsilon^3} \left(\frac{\varphi}{d} \right)^2 \frac{L}{A} \quad \text{oraz} \quad S_k = \frac{k C_o}{A} t \quad (3)$$

w_f – prędkość lub jednostkowa intensywność filtrowania, określana wzorem $w_f = Q/A = q$;

k – współczynnik wyznaczany eksperymentalnie;

C_o – stężenie zawiesin w wodzie surowej;

A – pole powierzchni złoza filtracyjnego;

d – średnica ziaren,

ε – współczynnik porowatości złoza czystego;

φ – współczynnik kształtu ziaren.

Biorąc pod uwagę układ filtra przedstawiony na rys. 1, można zauważyć, że przelew w zbiorniku wody uzdatnionej utrzymuje warunek $z_p \approx \text{const}$, nawet dla $Q(t)$. Przepływ Q przez układ filtra wymuszany jest przez napór hydrauliczny układu ΔH_u , definiowany różnicą poziomów zwierciadła górnego z nad złożem i dolnego z_p nad przelewem, tzn.

$$\Delta H_u = z - z_d. \tag{4}$$

Straty hydrauliczne h przepływu przez układ filtra określone są wzorem

$$h = h_o + h_k(t) + h_d + h_r = S_o Q + S_k(t) Q + S_d Q^2 + S_r Q^2 \tag{5}$$

Pierwsze dwa wyrazy po prawej stronie, najczęściej – dla przepływów laminarnych – są liniowe względem Q . Z opisu matematycznego procesu filtrowania wynika, że oporność $S_k(t)$ w każdym przypadku jest rosnącą funkcją czasu t filtrowania – na skutek kolmatacji.

Ponieważ spadek naporu ΔH_u zużywany jest na pokonanie strat hydraulicznych h , to $\Delta H_u = h$. W związku z tym, porównując prawe strony (4) i (5), otrzymujemy

$$z - z_p = S_o Q + S_k(t) Q + S_d Q^2 + S_r Q^2 \tag{6}$$

Jest to ogólna postać równania przepływu przez układ filtra. W każdym przypadku wielkościami stałymi są S_o , S_d i z_p ; natomiast pozostałe wielkości (S_r , z , Q) mogą się zmieniać w czasie t lub może być utrzymywana ich stała wartość. Na przykład:

- oporność S_r rury 2 może być zmieniana zaworem regulacyjnym lub innym urządzeniem regulacyjnym wmontowanym w rurę 2;
- rzędna z zwierciadła górnego – nad złożem filtracyjnym, może być zmienna $z(t)$ lub może być utrzymywany warunek $z = \text{const}$, przez zastosowania odpowiedniego układu regulacyjnego;
- przepływ Q przez układ filtra może być zmienny $Q(t)$ lub może być utrzymywany warunek $Q = \text{const}$ na skutek zastosowania odpowiedniego układu regulacyjnego.

Biorąc pod uwagę wzory (4) i (5) można stwierdzić, że rzędna z określa dyspozycyjny napór hydrauliczny ΔH_u układu filtrowania, natomiast przepływ Q określa straty hydrauliczne h . W związku z tym, w zależności od zastosowanego układu regulacji, mogą wystąpić 4 szczególnie przypadki hydraulicznych warunków filtrowania:

1. $\Delta H_u = \text{var}^*$ i $h = \text{const}$; lub $z = \text{var}$ i $Q = \text{const}$
2. $\Delta H_u = \text{const}$ i $h = \text{const}$; lub $z = \text{const}$ i $Q = \text{const}$
3. $\Delta H_u = \text{const}$ i $h = \text{var}$; lub $z = \text{const}$ i $Q = \text{var}$
4. $\Delta H_u = \text{var}$ i $h = \text{var}$; lub $z = \text{var}$ i $Q = \text{var}$

Wobec tego, z równania (6) wynika, że w zależności od konstrukcji filtra i zastosowanego układu regulacji przepływu można wyróżnić odpowiednie 4 rodzaje filtrów:

- I. dla zadanego przepływu $Q = \text{const}$ gdy $S_r = \text{const}$, tzn. gdy filtr nie jest regulowany, z równania (6) wynika, że rzędna $z(t)$ jest funkcją rosnącą;

* var – od łac. *variabilis* - zmienny, od ang. *variable* - zmienny; wielkość zmienna.

- II. dla zadanego przepływu $Q = \text{const}$, aby uzyskać spełnienie warunku $z = \text{const}$, z równania (6) wynika, że konieczne jest zastosowanie takiego układu regulacji, która spowoduje wystąpienie *malejącej oporności* $S_r(t)$ rury 2, gdyż na skutek kolmatacji złoża oporność $S_k(t)$ jest funkcją rosnącą;
- III. dla spełnienia żadanego warunku $z = \text{const}$, gdy dopływ do filtra $Q = \text{const}$, konieczne jest zastosowanie takiego układu regulacji, która spowoduje taką *malejącą oporności* $S_r(t)$ rury 2 oraz taki *malejący przepływ przez złożo* $Q(t)$, przy których będzie spełnione równania (6), gdy na skutek kolmatacji złoża oporność $S_k(t)$ jest funkcją rosnącą;
- IV. filtry bez układu regulacji i bez równomiernego rozdziału wody na poszczególne filtry, działające z *malejącą przepustowością* $Q(t)$ i *wzrastającą wysokością zwierciadła* $z(t)$ nad złożem, przy czym *przedział zmienności funkcji* $z(t)$ jest *zmniejszony* (w porównaniu ze zmiennością $z(t)$ w filtrze 1) przez *odpowiedni dobór oporności* $S_r = \text{const}$ rury 2 (rys. 4).

Oznacza to, że *filtry I i II charakteryzują się stałą prędkością filtrowania*, natomiast *filtry III i IV – malejącą prędkością filtrowania*.

Należy zauważyć, że interesujące i wartościowe, teoretyczne i eksperymentalne oraz wdrożeniowe prace badawcze filtrów z malejącą przepustowością prowadzi w Politechnice Krakowskiej profesor Wojciech Dąbrowski z współpracownikami [2,3,13,14].

5. Analiza porównawcza cech charakterystycznych filtrów

Z przeprowadzonych analiz poszczególnych rodzajów filtrów wynikają odpowiednie cechy charakterystyczne: strumienia przepływającego przez złożo filtracyjne, konstrukcji filtra na dopływie i odpływie, układu automatycznej regulacji. W celu wyeksponowania różnic i podobieństw analizowanych filtrów odpowiednie cechy zestawiono w tablicy.

tablica

Zestawienie cech charakterystycznych analizowanych rodzajów filtrów

		Rodzaj filtra				
		I	II.1	II.2	III	IV
Hydr-ne warunki filtrowania	ΔH_n – spadek naporu hydr-go układu	var	const		const	var
	h – strata hydr-na przepł. przez filtr	const	const		var	var
	z'' – rzędna zw. wody nad złożem	var	const		const	var
	Q – przepustowość filtra	const	const		var	var
Nr rysunku		1	2	3	4	5
konstrukcyjne cechy filtra	Równomierny rozrząd zasilania	+	+	–	–	–
	dolna komora przelewowa	+	+	–	–	+
hydrauliczne warunki	dopływu: z_0	const	const	const	var	var
	odpływu: z_p lub $z_d(t)$	$z_p = \text{const}$	$z_p = \text{const}$	$z_d(t)$	$z_d(t)$	$z_p \approx \text{const}$
regulacja	układ regulacji	–	+	+	+	–
	wielkości regulowane		z''	z'' i Q	z''	

6. Wnioski i uwagi końcowe

1. Przedstawiono cztery rodzaje filtrów grawitacyjnych, których budowa, wyposażenie i zasady działania oraz własności regulacyjne zapewniają, że, *ze względu na własności hydrauliczne i technologiczne należy traktować jako porównywalne rozwiązania alternatywne*. Każdy z filtrów charakteryzuje się różnymi zaletami i wadami. Natomiast ich sprawność technologiczna, na podstawie licznych krajowych i zagranicznych badań w technicznych warunkach eksploatacyjnych jest porównywalna. W Polsce stosowane są wszystkie rodzaje filtrów grawitacyjnych.
2. Przedstawiono podstawy do obliczania i wymiarowania instalacyjnego wyposażenia filtrów wszystkich czterech rodzajów filtrów, z uwzględnieniem regulatorów przepustowości przez filtr, tzn. prędkości filtrowania. Ponieważ procesy filtrowania wody i płukania złoża oraz przepływy przez układy poszczególnych rodzajów filtrów są bardzo złożone, to w konsekwencji tego metody obliczania nie są proste. W związku z tym należy zauważyć, że *podstawowym warunkiem racjonalnego projektowania układów filtrów oraz programowania eksploatacji w zmienionych warunkach*, np. na skutek zmiany przepustowości lub rozbudowy istniejących układów, są *wnikliwe i wielowariantowe obliczenia optymalizacyjne parametrów przepływu*. Podstawy ku temu dają odpowiednie rozdziały w [10].
3. Występujące i obwieszczane w piśmiennictwie technicznym w kraju i zagranicą liczne przypadki demontażu urządzeń regulacyjnych z powodu ich awaryjności, w świetle istniejącej wiedzy naukowej i technicznej, należy ocenić jako przejaw niskiej kultury technicznej eksploataatorów i braku znajomości zasad działania tych urządzeń. *Każde urządzenie techniczne wymaga odpowiedniej konserwacji i remontów*, ale do tego potrzebna jest znajomość zasad działania tych urządzeń. W przypadku braku kompetencji, gdy na skutek naturalnego zużycia wystąpi usterka jakiegoś elementu, powodująca wadliwe działanie, to najprostszym rozwiązaniem jest zdemontowanie całego urządzenia i stwierdzenie, że ono wadliwie działa, zatajając, że ono przez wiele lat działało poprawnie.
4. Referat dotyczy tylko filtrów grawitacyjnych, tymczasem, szczególnie w wodociągach osiedli niezurbanizowanych, gdzie ujmowane są wody podziemne, powszechnie występują *układy filtrów ciśnieniowych, charakteryzujące się większą lub mniejszą zmiennością przepustowości*, w zależności od tego czy są to *układy jednostopniowego pompowania lub układy dwustopniowego pompowania*. Racjonalne projektowanie układów filtrów ciśnieniowych wymaga takiej samej wnikliwości, w zakresie obliczeń hydraulicznych i optymalizacji, jak w przypadku układów filtrów grawitacyjnych.
5. Wprowadzenie do praktyki inżynierskiej przedstawionych **metod racjonalnego projektowania** złożeń filtracyjnych i układów filtrów, zwiększy producentom i dostawcom materiałów filtracyjnych *wymagania podawania w katalogach pełnych i dokładnych charakterystyk*, np. dotyczące gęstości materiału (oprócz gęstości nasypowej), poprawnie wyznaczonej średnicy zastępczej lub wyników analizy sitowej, współczynnika kształtu ziaren itp. wielkości występujących we wzorach i równaniach określających proces filtrowania wody i proces płukania złoża.

Bibliografia

- [1] AWWA Filtration Committee: Comparison of alternative systems for controlling flow through filters. *Journal of American Water Works Asspciation*. Vol. 76, 1984, No. 1, 91-95.
- [2] Dąbrowski W.: Obliczanie hydraulicznej współpracy filtrów o skokowo zmiennej wydajności. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. 1995, Nr 10, 361-367.
- [3] Dąbrowski W., Niemiec A.: Badania technologiczne stacji filtrów o skokowo zmiennej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. 1995, Nr 11, 383-386.
- [4] DEGRÉMONT: Mémento technique de léau. Paris 1979.
Tłum. na j. niem.: Handbuch der Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung. Wiesbaden 1974; tłum. na j. ang.: Water Treatment Handbook; Paris (1979), 2001; tłum. na j. ros.: Techniczeskie zapiski po problemam vody; tom 1 i 2; Moskwa 1983.
- [5] Di Bernardo L.: Designing declining-rate filters. *Filtration and Separation*. 1987, No. 5, 338-
- [6] Drożdż J.: Filtry z malejącą prędkością filtrowania – badania technologiczne i projektowanie. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. Vol. 61, 1987, Nr 7-8, 159-164.
- [7] Drożdż J.: Filtrowanie wody ze zmienną prędkością. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. Vol. 53, 1979, Nr 1, 18-19.
- [8] Drożdż J.: Otwarte układy do filtrowania wody ze zmienną prędkością. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. Vol. 53, 1979, Nr 4, 108-110.
- [9] Drożdż J.: Układy filtrów zamkniętych o zmiennej prędkości filtrowania. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. Vol. 53, 1979, Nr 7, 206-208.
- [10] Grabarczyk C.: Hydromechanika filtrowania wody. Warszawa 2010, WNT, 394 s.
- [11] Grabarczyk C.: Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe. Poznań 1997, Envirotech, 367 s.
- [12] Grabowski P.A., Larkina G.M.: Rabota skorych filtrov v peremennyh režimach. *Chimija i technologija vody*. Vol. 6, 1984, No. 6, 546-551.
- [13] Zielina M.: Badania oporów przepływu przez filtry eksploatowane ze stałą i skokowo zmienną wydajnością. *Czasopismo Techniczne*. Tom 100, 2003, z. 7-Ś, 315-334.
- [14] Zielina M., Dąbrowski W.: Zasady projektowania i eksploataowania stacji filtrów pospiesznych wody bez regulatorów natężenia przepływu. Kraków 2003, PK, Monografia 293, 112 s.