

**Tadeusz SIWIEC**

Zakład Wodociągów i Kanalizacji SGGW w Warszawie  
Division of Water Supply and Sewage Systems WULS – SGGW

## **Badanie skuteczności płukania filtrów odżelaziających** **Investigation of backwashing efficiency of rapid filters**

**Słowa kluczowe:** filtry, płukanie filtrów, ekspansja

**Key words:** filters, backwashing filters, expansion

### **Wprowadzenie**

Filtracja (PN-76/C-01350.10) jest jednym z ważniejszych procesów uzdatniania wody. Szczególnym przypadkiem jest filtracja wgłębna (Zielina i Dąbrowski 2001a), która polega na przepływie płynu przez ośrodek porowaty, w wyniku czego zanieczyszczenia stałe zawieszony w płynie oddzielają się i pozostają w przestrzeniach międzyziarnowych oraz na powierzchni ziaren. Efekt końcowy oddzielenia zanieczyszczeń, czyli oczyszczenia przepływającej przez złożę wody, zależy od wielu czynników, do których należy zaliczyć: granulację ziaren, porowatość, prędkość filtracji, rodzaj i rozmiary cząstek zanieczyszczeń itp. O stopniu skomplikowania zjawisk,

jakie zachodzą podczas filtracji, świadczy fakt, że w złożu udaje się zatrzymać nie tylko zanieczyszczenia o rozmiarach większych od rozmiarów porów, ale także zanieczyszczenia znacznie mniejsze (Montgomery 1985), nawet – jak podają Zielina i Dąbrowski (2001b) – o rozmiarach mniejszych niż 50  $\mu\text{m}$ .

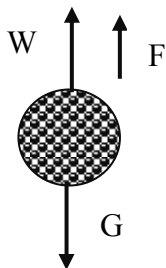
Zatrzymywanie zanieczyszczeń w przestrzeniach międzyziarnowych oraz na powierzchni ziaren powoduje wzrost oporów hydraulicznych, co potocznie jest nazywane kolmatacją złoża. To zjawisko jest obserwowane jako wzrost różnicy ciśnień między wlotem a wylotem z filtru. Dłuższe utrzymywanie takiego stanu powoduje spadek wydajności filtru lub konieczność zwiększania ciśnienia strumienia wlotowego. Drugi przypadek występuje zawsze wtedy, gdy filtr jest zasilany wodą za pomocą pompy i może w konsekwencji doprowadzić do przedostawania się cząstek zanieczyszczeń do strumienia wylotowego, obniżają

jąc skuteczność uzdatniania wody. Takie zjawisko jest nazywane „przebicciem filtru”.

Metodą na przywrócenie początkowych własności jest wyflukanie złoża.

## Istota procesu płukania

Płukanie jest realizowane przez wywołanie strumienia przepływu wody w kierunku odwrotnym do kierunku filtracji (w klasycznych filtrach pospieszonych z dołu do góry) i usunięcie zdeponowanych w złożu zanieczyszczeń. Analiza zjawiska polega na założeniu występowania równowagi układu sił, co pokazano na rysunku 1.



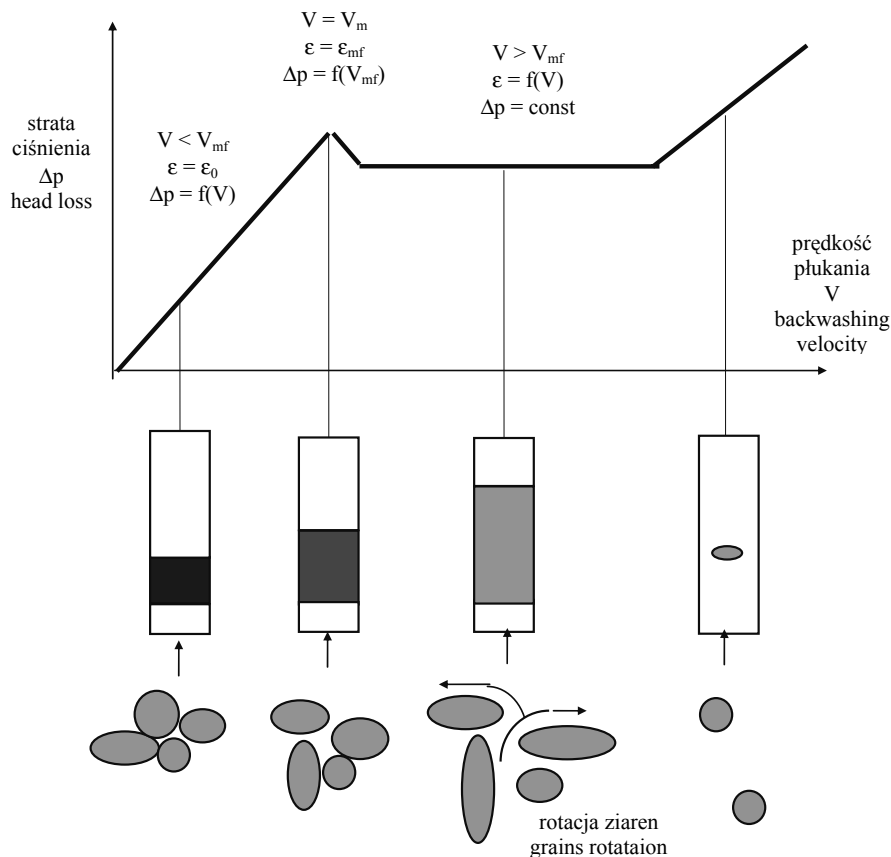
RYSUNEK 1. Schemat sił działających na ziarno złoża podczas płukania

FIGURE 1. Forces which are acting on beds particle during backwashing

Na każde ziarno złoża zanurzone w wodzie działają skierowane przeciwnie dwie siły – siła ciężkości ( $G$ ) i siła wyporu ( $W$ ). Gdy siła ciężkości jest większa od siły wyporu, wtedy złożo spoczywa na ruszcie. Jeśli rozpoczyna się płukanie, to wówczas dochodzi siła dynamiczna ( $F$ ), wynikająca z przepływu strumienia wody do góry. Wzrost siły dynamicznej powoduje, że ciężar pozorny zmniejsza się i przy odpowiedniej

wartości siły  $F$  może dojść do zrównania siły ciężkości z sumą siły wyporu i siły dynamicznej. Wówczas złożo staje się nieważkie i od tej chwili każdy wzrost prędkości strumienia płucznego przekłada się na wzrost siły  $F$  i w konsekwencji na ekspansję złoża. Bardziej precyzyjnie opis tych zjawisk został przedstawiony na rysunku 2.

Na osi poziomej przedstawiono prędkość płukania, natomiast na osi pionowej – straty ciśnienia (rys. 2). Wyobraźmy sobie, że po uruchomieniu pompy płucznej powoli jest otwierany zawór, dzięki czemu powoli wzrasta prędkość płukania. Początkowo siła dynamiczna jest mała, dlatego złożo spoczywa na ruszcie i warstwie podtrzymującej. Straty ciśnienia są opisywane funkcją liniową – przy małych prędkościach przepływu ( $V$ ), a funkcją kwadratową o ogólnej postaci  $\Delta p = f(V)$  – przy większych, natomiast porowatość złoża jest równa porowatości złoża w stanie spoczynku ( $\varepsilon_0$ ). Zwiększając sukcesywnie prędkość przepływu, a co za tym idzie – zwiększając siłę dynamiczną ( $F$ ), dochodzi się do punktu, w którym siła ta razem z wyporem równoważy ciężar ziaren i złożo staje się nieważkie. Punkt ten nazywany jest początkiem fluidyzacji (upłynnienia złoża) lub punktem minimum fluidyzacji ( $mf$ ) i oznaczany jest trzema wielkościami:  $V = V_{mf}$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_{mf}$  i  $\Delta p = f(V_{mf})$ . Od tego punktu dalsze zwiększanie prędkości strumienia płucznego skutkuje zwiększaniem ekspansji złoża, czyli zwiększaniem przestrzeni między ziarnami (porowatości), którą można zapisać jako  $\varepsilon = f(V)$ , a nie skutkuje zmianami strat ciśnienia, które są stałe  $\Delta p = \text{const}$ , gdyż zwiększanie prędkości płukania przekłada się



RYSUNEK 2. Zobrazowanie zjawisk zachodzących podczas płukania złoża (Orzechowski 1990)  
 FIGURE 2. Presentation of backwashing phenomena in filtration bed

nie na wzrost strat, lecz na zwiększanie się przekroju poprzecznego kanałów przepływowych. Granicznym punktem zwiększania prędkości ( $V$ ), a co za tym idzie – ekspansji złoża, jest zbliżanie się drobnych ziaren do krawędzi przelewu połączonego z rurą wylotową z filtra. Przekroczenie tej granicy skutkuje „ucieczką” drobnych frakcji złoża do kanalizacji.

Może być zastanawiające, dlaczego w okolicach punktu minimum fluidyzacji występuje „garbik”, powyżej którego straty ciśnienia się zmniejszają i dalej

mają wartość ustaloną. To podwyższenie strat ciśnienia wynika z faktu, że podczas filtracji ziarna złoża się ubijają i wzajemnie zakleszczają. Dlatego podczas zwiększania prędkości przepływu strumienia płucznego w chwili osiągnięcia punktu  $mf$  potrzebna jest większa siła, która nie tylko ma zrównoważyć ciężar ziaren, lecz także rozerwie zakleszczenie i wtedy ziarna mogą się zachowywać zgodnie z wykresem. Jeśli mierzono by straty ciśnienia w kierunku odwrotnym, czyli zmniejszając prędkość płukania od złoża w stanie ekspansji do złoża w sta-

nie nieruchomym, to tego zjawiska nie zaobserwowano by. Płukanie złożeń samą wodą, opisane powyżej, nie zawsze jest wystarczająco skuteczne, gdyż ziarna podczas ekspansji odsuwają się od siebie i rzadko dochodzi do zderzeń. W takiej sytuacji często nie udaje się usunąć przyklejonych do nich zanieczyszczeń, dlatego zaproponowano inne procedury, które powinny poprawić skuteczność oczyszczania złoża z zatrzymanych zanieczyszczeń.

### Metody płukania złożeń

W stacjach wodociągowych stosuje się cztery typowe procedury płukania (Cleasby in. 1975, 1977, Siwiec 1994a, Torgas 1983):

- płukanie samą wodą,
- przedmuchiwanie złoża powietrzem, a następnie płukanie wodą,
- jednoczesne płukanie wodą i przedmuchiwanie powietrzem,
- płukanie wodą wspomaganie płukaniem powierzchniowym.

Jak opisano powyżej, podczas płukania samą wodą złoża ulega ekspansji, w wyniku czego zwiększają się odległości między ziarnami. W takim przypadku istnieje możliwość pozbycia się zanieczyszczeń zatrzymanych w procesie cedzenia oraz, według Torgasa (1983), cząstek zatrzymanych w wyniku oddziaływań cząstka – cząstka i cząstka – złożo, ale należących do oddziaływań słabych.

Ocena efektywności płukania wielu filtrów doprowadziła do wniosku, że płukanie samą wodą nie jest zbyt skuteczne, bo w górnej części tworzą się bryły zanieczyszczeń o kształcie kuli-

stym, które sama woda nie jest w stanie rozbić i usunąć.

Przedmuchiwanie powietrzem, a następnie płukanie wodą polega na zatrzymaniu procesu filtracji, a następnie wypuszczeniu z filtra pewnej ilości wody, aby jej poziom wewnątrz filtra znalazł się poniżej krawędzi przelewowej. Taki zabieg zabezpiecza przed wydostaniem się ziaren złoża do rurociągu wylotowego podczas przepływu powietrza. Po wypuszczeniu części wody otwierany jest zawór na przewodzie sprężonego powietrza i rozpoczyna się przedmuchiwanie złoża. Przepływ powietrza przez złożo znajdujące się pod wodą wywołuje przemieszczanie się ziaren w jego wnętrzu i w związku z tym ich wzajemne ocieranie się. Jak stwierdzają Cleasby i inni (1977), przesuwający się pęcherzyk powietrza „ciągnie” za sobą pewną ilość wody oraz zanieczyszczeń, wynosząc je z dolnej części złoża na powierzchnię. Jak zaobserwowano w przezroczystej kolumnie (Siwiec 1994a, b), proces ten prowadzi do bardzo intensywnego zmętnienia warstwy wody nad złożem. Stopień zmętnienia jest tym wyższy, im wyższy jest stopień kolmatacji złoża, czyli ilość zatrzymanych zanieczyszczeń, oraz im większa jest intensywność przepływu powietrza. Proces ten podczas końcowego przepływu wody prowadzi do usunięcia zarówno zanieczyszczeń słabo związanych z ziarnami złoża, jak i złuszczonych podczas ocierania się ziaren o siebie. Po zakończeniu przedmuchiwania realizowane jest płukanie wodą, którego celem jest wyniesienie złuszczonych zanieczyszczeń do kanalizacji przy stosunkowo niewielkiej ekspansji.

Jednoczesne płukanie wodą i powietrzem polega na wtłaczaniu od dołu w tym samym czasie wody i powietrza. Woda wywołuje ekspansję złoża, natomiast przepływające między ziarnami ekspandowanego złoża pęcherzyki powietrza prowadzą do powstawania wirów oraz wzajemnych zderzeń ziaren, przyspieszając złuszczenie i wynoszenie zanieczyszczeń do kanalizacji. Po kilkuminutowym wspólnym płukaniu należy zamknąć dopływ powietrza i płukać samą wodą w celu doprowadzenia do uwarstwienia złoża, co jest szczególnie ważne w przypadku złożów wielowarstwowych. Z obserwacji zjawisk zachodzących podczas jednoczesnego płukania wodą i powietrzem wynika, że jest to trudny sposób płukania, gdyż złoże zachowuje się wtedy bardzo niestabilnie, wywołując wrażenie wrzenia (Siwiec 1994a). Pęcherzyki powietrza szybko zmieniają drogę przepływu, a wydostając się ze złoża i przepływając przez warstwę wody nad ekspandowanym złożem, często porywają ze sobą drobne ziarna złoża, podnosząc je do wysokości wylotu. W tym przypadku cząstki większe i cięższe dość szybko odrywają się od pęcherzyków i opadają w dół, natomiast lekkie nie zawsze zdążą odpaść od pęcherzyków i niektóre z nich wypływają razem z wodą poza filtr. Dlatego po kilku płukaniach może zmniejszyć się miąższość złoża i w konsekwencji pogorszyć efekt filtracji.

Płukanie wodą wspomagane płukaniem powierzchniowym polega na tym, że oprócz płukania wodą powierzchnia złoża jest splukiwana silnym strumieniem wody podawanej z rurociągu umieszczonego nad złożem przez małe otworki w kształcie dysz. Zabieg ten

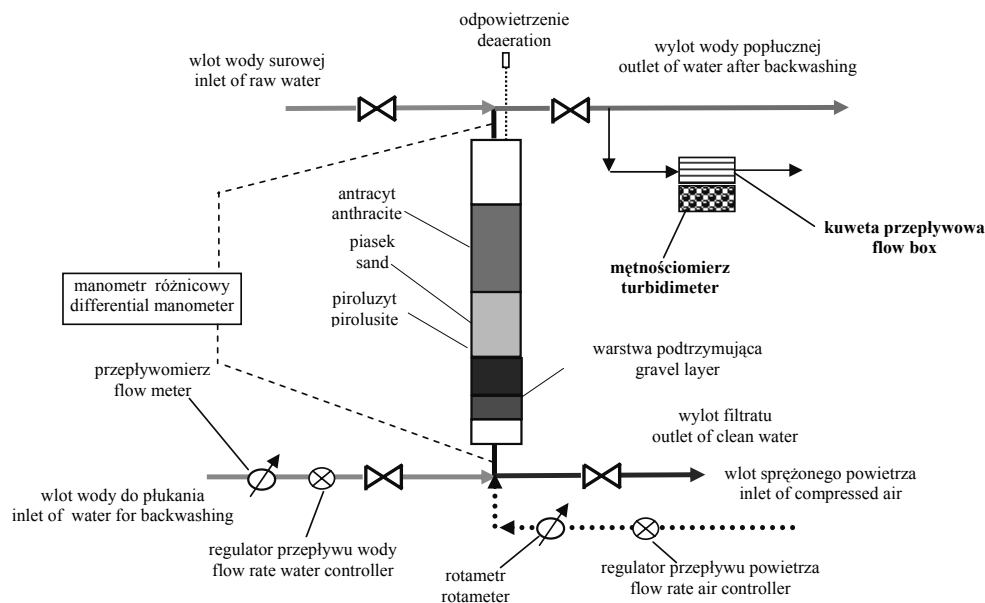
pozwała na ocieranie się cząstek złoża znajdujących się na jego powierzchni i w górnej warstwie przypowierzchniowej. Sposób ten jest rzadko stosowany, a jeżeli już, to tylko w filtrach otwartych.

## Badania eksperymentalne

Badania polegały na określeniu efektywności usuwania żelaza ze złoża przy wykorzystaniu płukania samą wodą, płukania jednoczesnego wodą i powietrzem oraz płukania samą wodą przy wcześniejszym przedmuchiowaniu złoża powietrzem. Do badań użyto kolumny zbudowanej z rury PLEXI o średnicy wewnętrznej 192 mm (rys. 3), wypełnionej złożem trójwarstwowym zbudowanym z piroluzytu, piasku i antracytu. Jego rolą było zatrzymywanie zanieczyszczeń podczas odżelaziania wody, które z kolei usuwane były w procesie płukania.

Aby warunki płukania między poszczególnymi cyklami były porównywalne, czyli aby w złożu zatrzymywana była taka sama ilość wodorotlenku żelazowego, proces kolmatacji w każdym cyklu odbywał się przy zachowaniu takiej samej prędkości filtracji oraz takiego samego czasu filtracji. W konsekwencji przefiltrowaniu ulegała taka sama ilość wody, to jest 2,1 m<sup>3</sup>. Zważywszy, że stężenie żelaza w wodzie surowej było prawie stałe, można uznać, że ilość zatrzymywanego wodorotlenku żelaza również była prawie stała.

Przed każdym cyklem ustalane były położenia regulatorów przepływu wody i powietrza, aby w chwili rozpoczęcia płukania, po całkowitym otworzeniu kulowych zaworów odcinających, strumienie płuczne miały odpowiednie natę-

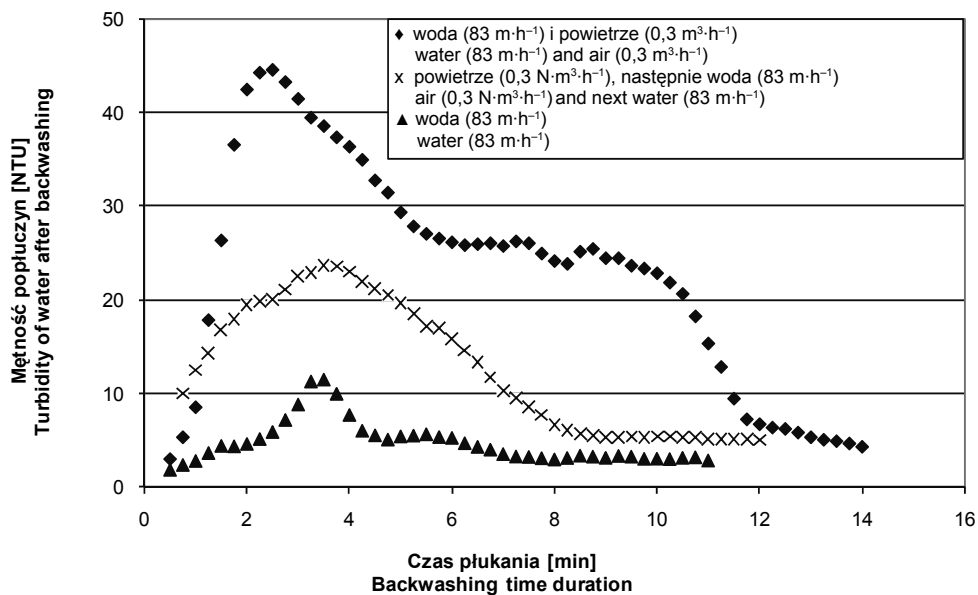


RYSUNEK 3. Schemat stanowiska badawczego  
 FIGURE 3. The scheme of research installation

żenia. Miarą skuteczności płukania była kontrola mętności wód popłucznych do czego wykorzystywano mętnościomierz 2100 N IS, firmy HACH, z kufką przepływową. Płukanie trwało zawsze do czasu, kiedy mętność popłuczyn spadała do poziomu poniżej 5 NTU, i trwało nie krócej niż 10 minut. Po zakończeniu płukania regulatory przepływu przestawiane były na inne wartości natężenia przepływu i cykl rozpoczynał się od początku.

Porównanie efektu płukania przy zastosowaniu pierwszych trzech metod zostało zamieszczone na rysunku 4. Miarą efektywności płukania została tu przyjęta mętność w wodach popłucznych w funkcji czasu trwania procesu płukania, która obrazuje stężenie zanieczyszczeń w tych wodach.

Z rysunku 4 wynika, że przebieg krzywych mętności wyraźnie się różni w zależności od zastosowanej procedury. Ocena efektywności płukania wyżej wymienionymi trzema metodami wskazuje, że największa ilość zanieczyszczeń zostaje usunięta podczas płukania jednoczesnego wodą i powietrzem. Wniosek ten można sformułować, analizując pola rozkładu stężenia zanieczyszczeń w funkcji czasu dla określonej intensywności płukania i badanej procedury (Siwiec 1994a, b, 2004). Gorszą procedurą jest przedmuchiwanie powietrzem, a następnie płukanie wodą, natomiast najgorszą – płukanie samą wodą. Nisko położone punkty krzywej, charakteryzującej płukanie samą wodą, świadczą o tym, że znaczna część zanieczyszczeń, które zostały zatrzymane podczas filtracji, pozostaje w złożu po płukaniu, co



RYSUNEK 4. Przebieg zmian mętności w funkcji czasu płukania przy zastosowaniu różnych procedur  
 FIGURE 4. Turbidity changes in function of backwashing time with use of different procedures

przekładać się będzie na wytwarzanie grubych warstw osadu na ściankach filtru oraz ziarnach złoża. Potwierdzeniem tego wniosku mogą być osady sklejające ziarna złoża ze sobą, które pokazane zostały na rysunkach 5 i 6. Są to fotografie ziaren złożeń pobranych z pracujących filtrów, w których skuteczność płukania była niezadowolająca.

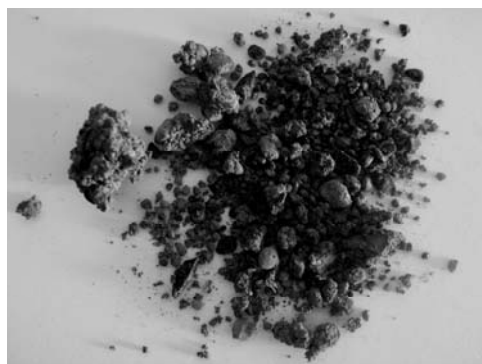
Mimo bardzo dobrej skuteczności jednoczesne płukanie wodą i powietrzem jest trudne, gdyż drobne odchyłki od właściwych natężeń przepływu mogą skutkować wynoszeniem ziaren złoża do kanalizacji. Dlatego zaleca się, aby najpierw złożo przez kilka minut przedmuchiwać powietrzem, a następnie płukać wodą. Przy właściwych intensywnościach przepływu powietrza takie sytuacje, jak pokazane na rysunkach 5 i 6, nie powinny wystąpić. Jedynie

w szczególnych przypadkach, jak brak możliwości przedmuchiwania powietrzem (np. filtry domowe – woda napowietrzana aspiratorem), można zdecydować się na płukanie wodą, licząc się z koniecznością okresowego bardziej skutecznego czyszczenia złoża lub jego wymianą.

Dodatkowo wykonano badania stężenia żelaza w serii wybranych próbek o znanej mętności, co pozwoliło na określenie zależności matematycznej, która wiązała mętność z ilością usuniętego żelaza. Analizując wówczas powierzchnię pod krzywymi mętności pokazanymi na rysunku 4 oraz dla innych przypadków opisanych przez autora (Siwiec 2007), można oszacować ilość żelaza usuwanego w poszczególnych procesach, co pokazano w tabeli 1.



RYSUNEK 5. Posklejane cząstki złoża (Weber 2010)  
FIGURE 5. Sticked particles of bed



RYSUNEK 6. Posklejane cząstki złoża wydobyte z różnych filtrów  
FIGURE 6. Sticked particles of bed removed from different filters

Jak widać z tabeli, najbardziej efektywne było jednoczesne płukanie wodą i powietrzem, gdyż do usunięcia 1 g żelaza potrzeba było najmniej wody. Mimo podwyższania skuteczności usuwania zanieczyszczeń niezbyt opłacalne jest płukanie z dużą intensywnością, gdyż każda minuta trwania procesu przekłada się na straty dużych ilości wody. Zwa-

żywszy na opisane powyżej spostrzeżenia o trudnościach realizowania jednoczesnego płukania wodą i powietrzem, godne polecenia jest przedmuchiwanie powietrzem, a następnie płukanie wodą. W tym przypadku zarówno zużycie wody, jak i efektywność płukania są akceptowalne.



TABELA 1. Sumaryczna i jednostkowa ilość usuniętego żelaza podczas płukania przy zastosowaniu wybranych procedur  
 TABLE 1. Total and unit mass of iron during backwashing by different procedures

Procedura płukania Backwashing procedure	Prędkość płukania wodą [m·h <sup>-1</sup> ] Velocity of water backwashing	Ilość usuniętego żelaza [mg Fe] Mass of removed iron	Średnie stężenie żelaza w wodach popłucznych [mg Fe·dm <sup>-3</sup> ] Average concentra- tion of iron in water after backwashing	Ilość zużytej wody na płukanie [m <sup>3</sup> ] Water volume used for backwashing	Woda zużyta na usunięcie 1 g Fe [m <sup>3</sup> wody·(1g Fe) <sup>-1</sup> ] Water volume used for removing of 1 g Fe
Płukanie wodą Water backwashing	57	123,3	0,51	0,30	2,45
	83	240,4	0,75	0,44	1,83
Przedmuchiwanie powietrzem, a następnie płukanie wodą Air blowing and next water back- washing	57	299,6	1,14	0,33	1,10
	57	678,0	2,20	0,38	0,57
Jednoczesne płukanie powietrzem i wodą Simultaneously water and air backwashing	83	561,0	1,46	0,56	1,00

## Podsumowanie

Zaprojektowanie układu płuknego, czyli dobór pompy wraz z całym oprzyrządowaniem, powinno być dokonane bardzo starannie, aby pompa tłoczyła wodę o intensywności pozwalającej na uzyskanie właściwej ekspansji. A więc woda powinna płynąć z prędkością większą od minimalnej prędkości fluidyzacji, lecz niezbyt dużą, aby niemożliwe było wydostawanie się ziaren złoża z filtra do kanalizacji. Z tego względu należy w pierwszej konieczności obliczyć wymagane warunki płukania [Siwiec 2007], a dopiero do nich dobrać pompę.

Porównując metody płukania, można stwierdzić, że najbardziej efektywne usunięcie zanieczyszczeń uzyskuje się podczas jednoczesnego płukania wodą i powietrzem. Jednak ze względu na trudności eksploatacyjne związane z możliwością „uciekania” pojedynczych ziaren do kanalizacji równie skuteczne, a zarazem bezpieczniejsze jest przedmuchiwanie powietrzem, a dopiero później płukanie wodą. Najmniej skuteczne jest płukanie samą wodą.

## Literatura

- CLEASBY J.L., STANGL E.W., RICE G.A. 1975: Developments in backwashing of granular filter. *Journal of the Environmental Engineering Division* 5: 713–727.
- CLEASBY J.L., ARBOLEDA J., BURNS D.E., PRENDVILLE P.W., SAVAGE E.S. 1977: Backwashing of granular filters. *Journal AWWA*, February: 115–126.
- MONTGOMERY J.M. 1985: Water treatment. Principles and design. John Wiley & Sons, New York.
- ORZECZOWSKI Z. 1990: Przepływy dwufazowe. PWN, Warszawa.

- PN-76/C-01350.10. Procesy podstawowe w inżynierii chemicznej. Filtracja cieczy. Nazwy i określenia.
- SIWIEC T. 1994a: Podstawy naukowe płukania zautomatyzowanych filtrów ciśnieniowych. Maszynopis. Sprawozdanie z grantu KBN nr 608689101.
- SIWIEC T. 1994b: Eksperymentalne badania technologicznych i hydraulicznych warunków płukania złóż wielowarstwowych. Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”. PZLiTS, Poznań.
- SIWIEC T. 2004: Sprawozdanie z grantu SGGW nr 50405250011 „Badania efektywności płukania filtrów wielowarstwowych”. Maszynopis.
- SIWIEC T. 2007: Warunki płukania jednowarstwowych i dwuwarstwowych filtrów pospiesznych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- TOREGAS G. 1983: Using backwashing kinetics to evaluate attachment mechanism and forces during filtration. *Journal AWWA* May: 254–260.
- WEBER Ł. 2010: Eksploatacja stacji uzdatniania wody podziemnej. Cz. IV. *Technologia Wody* 4 (06): 48–53.
- ZIELINA M., DĄBROWSKI W. 2001a: Modelowanie filtracji pospiesznej przy użyciu metody UBE. *Czasopismo Techniczne, Budownictwo* 3-B: 184–200.
- ZIELINA M., DĄBROWSKI W. 2001b: Modele makroskopowe w filtracji pospiesznej. *Czasopismo Techniczne, Budownictwo* 3-B: 202–221.

## Summary

**Investigation of backwashing efficiency of rapid filters.** The paper presents phenomena which occur during backwashing of rapid filters and explains different notations such as minimum fluidization velocity and bed expansion. It further describes the main backwashing methods i.e. with water only, with air blowing at first step and water backwashing at second step and simultaneously backwashing with air and water. Investigations show that the best is simultaneously backwashing with air and

water, worse air blowing and next water backwashing and alone water backwashing. Backwashing with water only has a small effectiveness. Significant influence air blowing on effective backwashing filters is confirmed by photos which show stuck grains with sediments. These grains were removed from filters which were backwashing with to small effectiveness.

**Author's address:**

Tadeusz Siwiec  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Zakład Wodociągów i Kanalizacji  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e`mail: tadeusz\_siwiec@sggw.pl