

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2019), 28 (3), 476–487
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2019), 28 (3)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2019), 28 (3), 476–487
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2019), 28 (3)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2019.28.3.44

Yuliya TRACH¹, Piotr WICHOWSKI²

¹Narodowy Uniwersytet Gospodarki Wodnej i Wykorzystania Zasobów Naturalnych
National University of Water and Environmental Engineering

²Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences
– SGGW

Optymalizacja parametrów technologicznych filtra z granulowanym złożem polistyrenowym do uzdatniania wody kotłowej (studium przypadku) Optimization of technological parameters of the filter with granular polystyrene bed for treatment boiler water (case study)

Słowa kluczowe: filtr wstępnego oczyszczania, parametry filtracji, kinetyka filtracji, efektywność

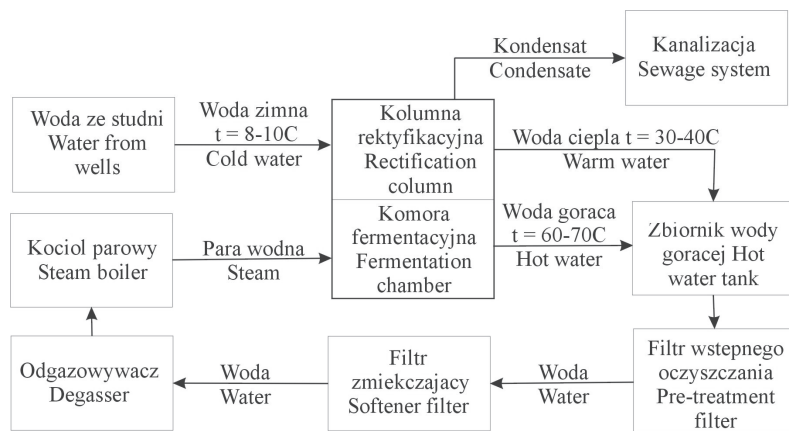
Key words: pre-treatment filter, filtration parameters, filtration kinetics, efficiency

Wprowadzenie

Na Ukrainie większość gorzelni do celów technologicznych stosuje wodę kotłową w obiegach częściowo zamkniętych, co gwarantuje racjonalne wykorzystanie zasobów wodnych oraz oszczędność energii. Uproszczony schemat technologiczny obiegu wody kotłowej w analizowanej gorzelni przedstawiono na rysunku 1. Para wodna wytwarzana w

kotle parowym wykorzystywana jest do podgrzewania komory fermentacyjnej. W efekcie ulega skropleniu i schłodzeniu do temperatury 60–70°C, a następnie trafia do zbiornika wody gorącej. Kolumny rektyfikacyjne chłodzone są wodą o temperaturze 8–10°C, pobieraną bezpośrednio ze studni. Wskutek tego procesu woda ulega podgrzaniu do temperatury 30–40°C i również jest odprowadzana do zbiornika wody gorącej, w którym temperatura wody waha się w granicach 50–55°C.

Wody naturalne, a także wodociągowe nie nadają się do celów kotłowych bez wcześniejszego przygotowania, gdyż muszą spełniać specjalne wyma-



RYSUNEK 1. Schemat obiegu wód technologicznych przy produkcji alkoholu w gorzelnii na Ukrainie
 FIGURE 1. Flow chart of heat-exchanging water used in alcohol production in a distillery in Ukraine

gania związane z konstrukcją kotłów, ich eksploatacją, obciążeniem cieplnym czy jakością materiałów, z których zostały wykonane. Z tego względu nie jest możliwe określenie jednoznacznych wymagań dla wody kotłowej (Totczyk, Okoński i Boszke, 2012). Jakość wody obiegowej i zasilającej kotły zależy od jakości wody dodatkowej kierowanej do uzupełnienia strat w tych obiegach. Na jakość wody obiegowej wpływają także nawet niewielkie przecieki w obrębie wymienników ciepłowniczych mających styczność z parą, co prowadzi do pogorszenia jakości kondensatów (Litwinowicz, 2010). Woda gorąca, aby mogła być ponownie wykorzystana w kotłach parowych, musi być uprzednio oczyszczona w celu spełnienia wymagań podawanych przez producentów kotłów oraz norm PN-C-04601:1985 i PN-EN 12952-12:2006. W analizowanym obiekcie proces podczyszczania jest realizowany w układzie technologicznym, w skład którego wchodzi: filtr wstępnego oczyszczania, filtr zmiękczający oraz zbiornik odgazowujący.

Ważnymi elementami układów technologicznych podczyszczania wody doprowadzanej do kotłów parowych są filtry zmiękczające, których efektywność zależy przede wszystkim od jakości dopływającej wody. Woda z nadmierną koncentracją zanieczyszczeń organicznych i mineralnych negatywnie wpływa na ich pracę. W rezultacie nieusunięte na filtrze sole (Ca^{2+} , Mg^{2+}) osadzają się na powierzchni kotłów parowych, co zmniejsza ich sprawność. Kotły takie ulegają wcześniejszemu zużyciu i mogą wpływać na przestoje linii produkcyjnych przedsiębiorstwa. Tabela 1 przedstawia obowiązujące na Ukrainie wytyczne dotyczące wskaźników jakości wody dopływającej do filtra zmiękczającego.

W celu ograniczenia ilości zanieczyszczeń organicznych i mineralnych (przede wszystkim żelaza) w wodzie dostarczanej do filtra zmiękczającego należy zastosować filtr wstępnego oczyszczania. Zachodzą w nim procesy biologicznego oczyszczania (Hiroł i Trach, 2006; Zhurba, Govorov,

TABELA 1. Dopuszczalne wartości wskaźników fizykochemicznych w wodzie dopływającej do filtra zmiękczającego (Wytyczne SNiP II 35-76)

TABLE 1. Acceptable values of physicochemical indicators in the water supplied to the softening filter (Guidelines SNiP II 35-76)

Wskaźnik – Indicator	Jednostka Unit	Stężenie Concentration
Zawartość zawiesiny – Total suspension solids content	mg·dm ⁻³	do 1,5
Całkowita zawartość soli – Total salt content	mg·dm ⁻³	do 1000
Barwa – Color	mg Pt·dm ⁻³	do 30
Stężenie żelaza całkowitego – Total iron concentration	mg Fe·dm ⁻³	do 0,3
Stężenie siarczków – Sulfides concentration	mg S·dm ⁻³	–
Stężenie <i>ChZT</i> – <i>COD</i> concentration	mg O ₂ ·dm ⁻³	do 6

Govorova i Kvartenko, 2012) w połączeniu z filtracją przez granulowany materiał. Jako materiał filtracyjny można stosować m.in. piasek krzemionkowy lub granulki spienionego polistyrenu (Hirol, Kowalski, Hirol i Jakimchuk, 2008; Hirol, Kowalski, Hirol, Jakimchuk i Trach, 2009; Zhurba, 2011; Orlov, Martynov i Kunytskiy, 2016). Istotne są badania technologiczne pozwalające na określenie właściwych parametrów pracy analizowanego filtra.

Celem przeprowadzonych badań było określenie optymalnych parametrów technologicznych filtra wstępnego oczyszczania wody gorącej dla analizowanego obiegu. Badano wpływ prędkości filtracji, wysokości oraz granulacji polistyrenowego złoża filtracyjnego na efektywność zmniejszenia wartości *ChZT* oraz stężenia żelaza ogólnego w uzdatnianej wodzie. Określono także kinetykę obniżania tych wskaźników w funkcji wysokości warstwy złoża polistyrenowego.

Material i metoda badań

W celu określenia jakości wody ujmowanej ze studni oraz z wody zmieszanej gromadzonej w zbiorniku wody go-

rażej wykonano w trzech powtórzeniach oznaczenia wybranych wskaźników fizykochemicznych. Wyniki przedstawiają wartość średnią. W pobranych próbkach wody według obowiązującej metodyki oznaczano:

- pH (MBB 081/12-0317-06. Metoda wykonywania pomiarów metodą elektrometryczną indeksu wodorowego pH),
- mętność (GOST 3351-74. Metody określania smaku, zapachu, barwy i mętności),
- stężenie *ChZT* (GOST 23268.12-78. Metoda oznaczania utleniania nadmanganianu),
- stężenie żelaza (MBB 081/12-0175-05. Metoda pomiaru stężenia masy żelaza metodą fotokolorymetryczną z rodankiem),
- stężenie manganu (MBB 081/12-0107-03. Metoda pomiaru stężenia masowego manganu metodą fotokolorymetryczną z nadsiarczanem amonu),
- stężenie jonu amonowego (MBB 081/12-0106-03. Metoda wykonywania pomiarów stężeń masowych jonów amonowych metodą fotokolorymetryczną z odczynnikiem Nesslera),

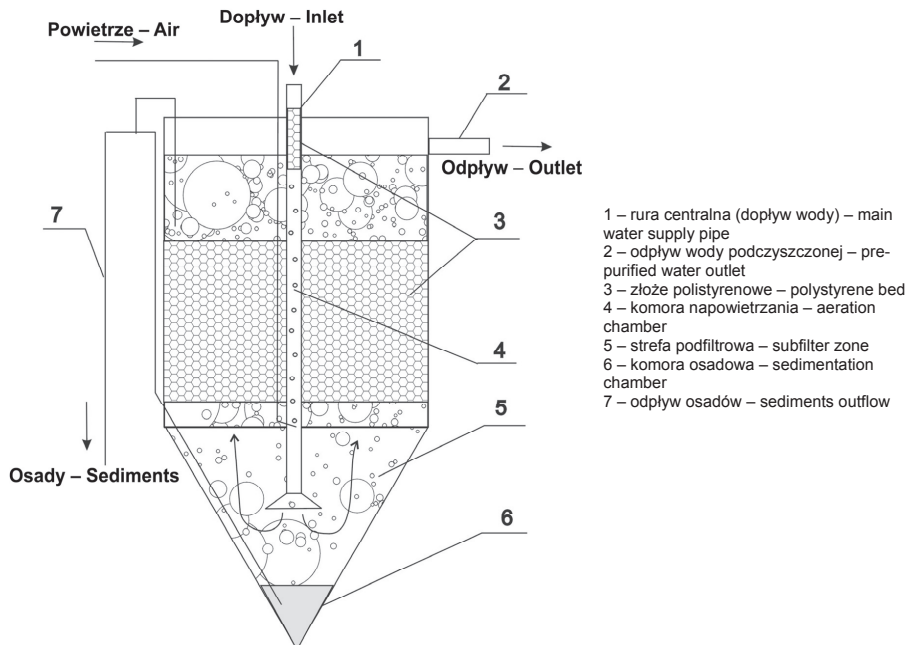
- stężenie azotanów (MBB 081/12-0651-09. Metoda pomiaru stężenia masowego jonów azotanowych metodą fotokolorymetryczną),
- stężenie magnezu (MBB 081/12-0644-09. Metoda pomiaru stężenia masowego wapnia i magnezu za pomocą metody miareczkowania),
- zawartość tlenu rozpuszczonego (DSTU ISO 5813:2004. Oznaczanie rozpuszczonego tlenu. Metoda jodometryczna).

Budowę filtra wstępnego oczyszczania wody gorącej przedstawiono na rysunku 2. Wykonano go z rury z tworzywa sztucznego o średnicy wewnętrznej $D = 140$ mm. W celu poprawy nasycania tlenem wody dopływającej do rury centralnej o średnicy wewnętrznej 50 mm doprowadzono sprężone powietrze, a w górnej części umieszczono pływające

złoże polistyrenowe o wysokości warstwy 0,7 m. Rolą granulek polistyrenu w komorze napowietrzania była dyspersja powietrza na drobne pęcherzyki. Ponadto umieszczenie ziaren polistyrenowych w centralnej części filtra zapobiegło szybkiej desorpcji powietrza, zwiększając w ten sposób czas kontaktu powietrza z wodą. Podczas prowadzonych badań nasycenie wody tlenem w komorze napowietrzania wynosiło $5,7\text{--}6,0$ mg $\text{O}_2\cdot\text{dm}^{-3}$. Złoże filtrowano napowietrzoną wodą w kierunku od dołu do góry, a następnie kierowano do króćca odpływowego.

W ramach badań efektywności pracy filtra ze złożem polistyrenowym z komorą napowietrzania określono:

- optymalne parametry technologiczne filtracji (prędkość filtracji, wysokość



RYSUNEK 2. Schemat filtra ze złożem polistyrenowym z komorą napowietrzania
 FIGURE 2. Filter scheme with a polystyrene bed with an aeration chamber

- warstwy filtracyjnej, średnicy ziarna materiału filtracyjnego),
- kinetykę obniżenia wskaźnika *ChZT* w funkcji wysokości warstwy złoża polistyrenowego,
 - kinetykę usuwania żelaza w funkcji wysokości warstwy złoża polistyrenowego.

Badania technologiczne prowadzono dla trzech prędkości filtracji 6, 7 oraz 8 m·h⁻¹, stałej wysokości złoża wynoszącej *H* = 1,2 m oraz średniej granulacji *d* = 1,25 mm.

Badania wykonano dla zmiennej wysokości polistyrenowego złoża filtracyjnego o wysokości *H* = 0,8; 1,0 oraz 1,2 m oraz stałej prędkości filtracji *V* = 7 m·h⁻¹ i średniej granulacji wypełnienia złoża wynoszącej *d* = 1,25 mm.

Dodatkowo wykonano badania dla średniej granulacji wypełnienia *d* = 0,75; 1,25 oraz 1,75 mm przy stałej wysokości złoża *H* = 1,2 m oraz prędkości filtracji *V* = 7 m·h⁻¹.

W ramach badań optymalizacyjnych pracy złoża filtracyjnego w procesie oczyszczania wód technologicznych określono kinetykę usuwania *ChZT* oraz żelaza w funkcji wysokości warstwy filtracyjnej. W tym celu pobierano próbki przefiltrowanej wody co 15 cm wysokości złoża filtracyjnego, a następnie oznaczano stężenie *ChZT* i żelaza ogólnego w pobranych próbkach. Zastosowana wysokość złoża wynosiła *H* = 1,2 m, prędkość filtracji *V* = 6 m·h⁻¹, a granulacja wypełnienia polistyrenowego *d* = 1,25 mm. Oznaczenia wykonywano w czterech przedziałach czasu pracy filtra, tj. 2–4, 6–8, 10–12 oraz 14–16 h od początku procesu filtracji.

Wyniki badań i ich omówienie

Wskaźniki jakości wody ujmowanej ze studni oraz z wody zmieszanej gromadzonej w zbiorniku wody gorącej przedstawiono w tabeli 2. Woda gromadzona w zbiorniku wody gorącej charakteryzowała się zbyt wysokim stężeniem *ChZT* (35 mg O₂·dm⁻³) oraz nadmierną koncentracją żelaza (3,5 mg Fe·dm⁻³) i nie spełnia wymogów określonych według Wytycznych SNiP II 35-76. Nie powinna być bezpośrednio kierowana na filtr zmiękczający. Konieczne jest jej uzdatnienie na filtrze wstępnego oczyszczania tak, aby na odpływie stężenie żelaza całkowitego nie przekraczało 0,3 mg Fe·dm⁻³, a *ChZT* 6 mg O₂·dm⁻³. Chemiczne zapotrzebowanie tlenu jest pojęciem umownym i oznacza ilość tlenu pobranego z utleniacza w umownych warunkach na utlenienie związków organicznych i niektórych nieorganicznych, np. soli żelaza(II), azotanów(III) i innych (Kiedrzyńska, Papciak i Granops, 2006). Wysokie stężenie *ChZT* wiąże się prawdopodobnie z obecnością soli żelaza(II), ale może także wynikać z obecności substancji organicznych dostających się do wody obiegowej wskutek przecieków w obrębie wymienników ciepła.

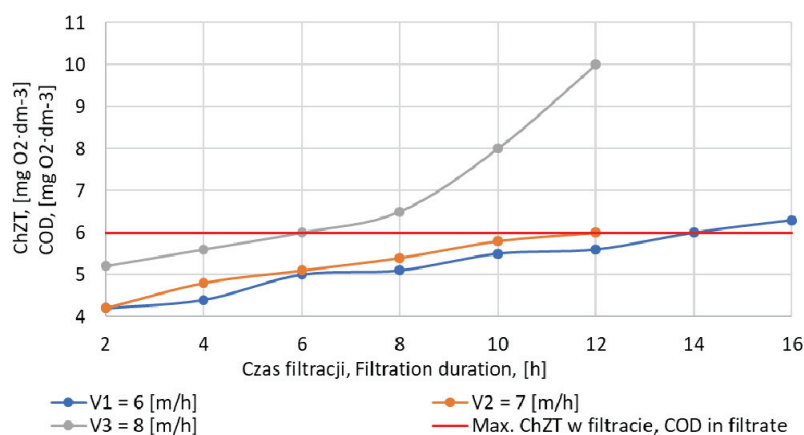
Stężenie *ChZT* w podczyszczonej wodzie w zależności od prędkości filtracji oraz czasu pracy filtra od ostatniego płukania przedstawiono na rysunku 3.

Podczas filtracji podczyszczanej wody cieplej z *V* = 6 m·h⁻¹ przekroczenie dopuszczalnego stężenia *ChZT* w filtracie nastąpiło po 14 h filtracji, przy *V* = 7 m·h⁻¹ – po 12 h, a w trakcie filtracji z *V* = 8 m·h⁻¹ – po 6 h. Stwierdzono,

TABELA 2. Średnie wartości wskaźników fizykochemicznych wody podziemnej oraz wody pobranej ze zbiornika gorącej wody

TABLE 2. Average values of physicochemical indicators of groundwater quality and of water taken from the hot water reservoir

Wskaźnik – Indicator	Jednostka Unit	Woda ze studni Water from well	Zbiornik wody gorącej Hot water tank
pH	–	7,15	6,9
Mętność – Turbidity	NTU	–	5
Stężenie ChZT – COD concentration	mg O ₂ ·dm ⁻³	15	35
Stężenie jonu amonowego – Ammonium ion concentration	mg NH ₄ ⁺ ·dm ⁻³	0,88	0,62
Stężenie azotanów – Nitrates concentration	mg NO ₃ ·dm ⁻³	0,88	0,3
Stężenie magnezu – Magnesium concentration	mg Mg·dm ⁻³	7,2	6
Stężenie żelaza całkowitego – Total iron concentration	mg Fe·dm ⁻³	4	3,5
Stężenie manganu – Manganese concentration	mg Mn·dm ⁻³	0,065	0,05
Zawartość tlenu rozpuszczonego – Dissolved oxygen content	mg O ₂ ·dm ⁻³	4,51	2,77



RYSUNEK 3. Wykres rozkładu stężenia ChZT w filtracie przy różnych prędkościach filtracji (V_1 , V_2 , V_3) w funkcji czasu filtracji od ostatniego płukania ($H = 1,2$ m, $d = 1,25$ mm)

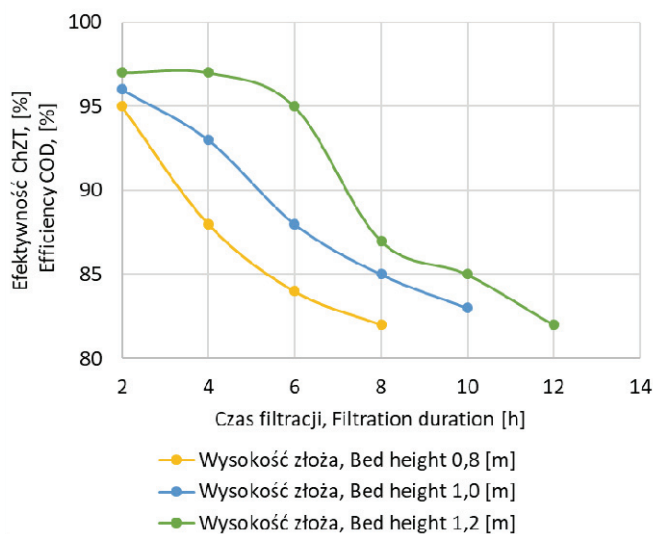
FIGURE 3. Chart of COD concentration distribution in filtrate at different filtration speeds (V_1 , V_2 , V_3) as a function of filtration time since the last rinsing ($H = 1.2$ m, $d = 1.25$ mm)

że wraz ze wzrostem prędkości filtracji skróceniu ulega czas filtrycyklu. Dla porównania czas filtracji przez złożo wykonane z piasku kwarcowego z kierunkiem filtracji od dołu do góry o wysokości złoża $H = 1,2$ m, średnicy ziaren piasku $d = 1,25$ mm, dla dwóch prędkości filtracji $V = 6 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ i $V = 7 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ do uzyskania maksymalnego akceptowalnego stężenia $ChZT$ w odpływie był jednakowy i wynosił 12 h. Dla piasku kwarcowego zmiana prędkości filtracji w tym zakresie nie wpłynęła na czas trwania filtrycyklu. Stwierdzono, że przy prędkości filtracji $V = 6 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ dla złoża polistyrenowego uzyskano o 17% dłuższy czas pracy w porównaniu do złoża kwarcowego. Porównując wyniki badań własnych do parametrów pracy typowego filtra ze złożem filtracyjnym z piasku kwarcowego, uzyskano porównywalne lub nieco lepsze parametry. Potwierdzają to bada-

nia Schöntag, Pizzolattiego, Jangady, de Souza i Sensa (2015).

Badania wpływu wysokości warstwy filtracyjnej na efektywność pracy filtra polistyrenowego dowodzą, że wraz ze wzrostem miąższości warstwy filtracyjnej rośnie jego skuteczność oczyszczania przy jednoczesnym wzroście czasu filtrycyklu (rys. 4). Filtr przy miąższości złoża $H = 0,8$ m już po 8 h pracy w przefiltrowanej wodzie osiągnął dopuszczalne stężenie $ChZT$ wynoszące $6 \text{ mg O}_2\cdot\text{dm}^{-3}$, przy minimalnej dopuszczonej sprawności zmniejszenia wartości $ChZT$ wynoszącej 82%. Dla porównania przy wysokości złoża $H = 1,2$ m minimalną akceptowalną sprawność obniżania stężenia $ChZT$ zaobserwowano po 12 h cyklu filtracji.

Wpływ granulacji złoża filtracyjnego na efektywność zmniejszenia wartości $ChZT$ w uzdatnianej wodzie oraz



RYSUNEK 4. Efektywność usunięcia $ChZT$ w funkcji czasu trwania cyklu filtracji dla różnych wysokości złoża filtracyjnego przy $d = 1,25$ mm, $V = 7 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$

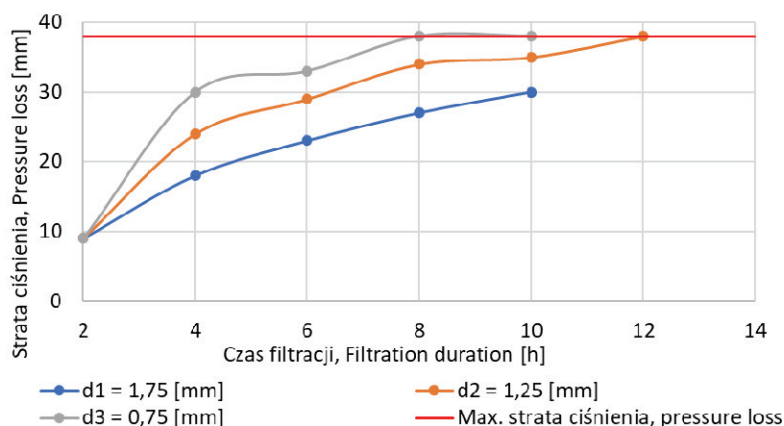
FIGURE 4. Effectiveness of COD removal as a function of the duration filtration cycle for different height of the filter bed at $d = 1.25$ mm, $V = 7 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$

obserwowane straty ciśnienia przedstawiono na rysunku 5. Czas trwania cyklu filtracji przy wysokości złoża $H = 1,2$ m, prędkości filtracji $V = 7 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ i średniej granulacji złoża $d = 0,75$ mm wynosił 10 h, a 12 h przy granulacji $d = 1,25$ mm. Krótszy czas trwania cyklu filtracji przy granulacji $d = 0,75$ mm związany był z szybkim osiągnięciem krytycznego spadku ciśnienia ($38 \text{ mm H}_2\text{O}$), spowodowanym zamulaniem dna warstwy filtracyjnej w kierunku filtracji do góry, mimo iż stężenie $ChZT$ w filtracie nie przekraczało wartości dopuszczalnej ($6 \text{ mg O}_2\cdot\text{dm}^{-3}$). Odwrotna sytuacja zaistniała przy granulacji złoża $d = 1,75$ mm, w której czas filtracji trwał 10 h, ale filtr usunięto do czyszczenia z powodu przekroczenia dopuszczalnej wartości $ChZT$ w filtracie, a nie osiągnięcia dopuszczalnego spadku ciśnienia na filtrze.

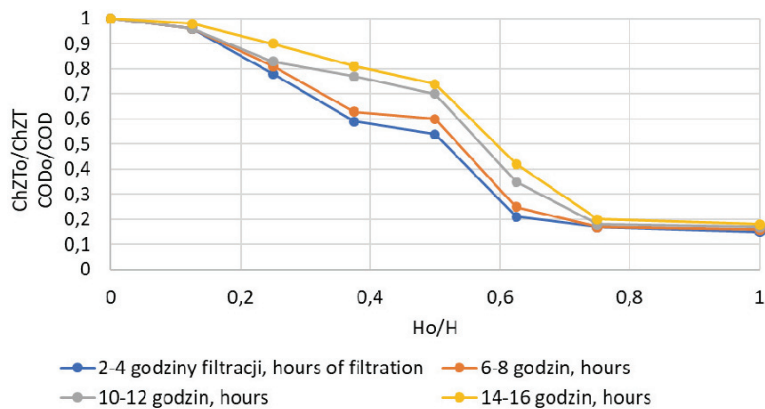
Kinetykę zmniejszenia wartości wskaźnika $ChZT$ oraz usuwania żelaza w funkcji wysokości warstwy złoża po-

listyrenowego przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Analizując kinetykę zmniejszania wartości wskaźnika $ChZT$ oraz koncentracji żelaza ogólnego, zaobserwowano, że w początkowej fazie filtracji intensywniej usuwane z wody jest żelazo. W połowie wysokości złoża filtracyjnego stężenie żelaza w filtrowanej wodzie wynosi około 30–40% wartości początkowej, podczas gdy dla $ChZT$ proporcja ta jest większa i wynosi około 55–75%. Z powyższego wynika, że zapotrzebowanie na tlen uzdatnianej wody związane jest nie tylko z utlenianiem żelaza(II), ale również obecnych w niej substancji organicznych. Przy filtracji wody przez złożo polistyrenowe w kierunku od dołu do góry występują dwie strefy: w dolnej strefie złoża dominuje proces mechanicznego osadzania utlenionego żelaza, w górnej intensywniej następuje obniżanie wskaźnika $ChZT$. Na tej podstawie można wysunąć hipotezę, że w dolnej



RYSUNEK 5. Wykres zależności spadku ciśnienia w funkcji czasu trwania filtracji w warunkach $V = 7 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, $H = 1,2$ m oraz granulacji polistyrenu $d_1 = 1,75$ mm, $d_2 = 1,25$ mm, $d_3 = 0,75$ mm
 FIGURE 5. Graph of pressure drop as a function of filtration duration in conditions $V = 7 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, $H = 1.2$ m and polystyrene granulation $d_1 = 1.75$ mm, $d_2 = 1.25$ mm, $d_3 = 0.75$ mm



$ChZT$ – chemiczne zapotrzebowanie na tlen w wodzie trafiającej na filtr ($35 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$)

COD – chemical oxygen demand in water filtered ($35 \text{ mg O}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$)

$ChZT_o$ – chemiczne zapotrzebowanie na tlen na wysokości warstwy filtrującej złoża

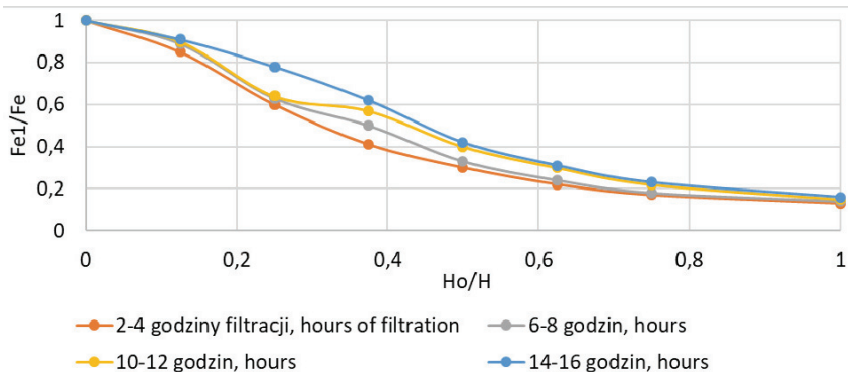
COD_o – chemical oxygen demand at the level of the bed filter layer

H – wysokość całkowita złoża – the total height of the bed

H_o – wysokość warstwy filtrującej złoża – the height of the bed filter layer

RYSUNEK 6. Kinetyka zmniejszania wartości $ChZT$ w funkcji wysokości warstwy filtrującej złoża polistyrenowego w warunkach $V = 6,0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, $d = 1,25 \text{ mm}$, $H = 1,2 \text{ m}$

FIGURE 6. Kinetics of reduction the COD value as a function of the height of the polystyrene bed filter layer in the conditions of $V = 6.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, $d = 1.25 \text{ mm}$, $H = 1.2 \text{ m}$



Fe – stężenie żelaza w wodzie trafiającej na filtr ($3,5 \text{ mg Fe} \cdot \text{dm}^{-3}$) – concentration of iron in the filtered water ($3.5 \text{ mg Fe} \cdot \text{dm}^{-3}$)

Fe_1 – stężenie żelaza na wysokości warstwy filtrującej złoża – concentration of iron at the height of the bed filter layer

H – wysokość całkowita złoża – total height of the bed

H_o – wysokość warstwy filtrującej złoża – height of the bed filter layer

RYSUNEK 7. Kinetyka zmniejszania wartości żelaza w funkcji wysokości warstwy filtrującej złoża polistyrenowego w warunkach: $V = 6,0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, $d = 1,25 \text{ mm}$, $H = 1,2 \text{ m}$

FIGURE 7. Kinetics of the iron value reduction as a function of the height of the polystyrene bed filter layer in conditions: $V = 6.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, $d = 1.25 \text{ mm}$, $H = 1.2 \text{ m}$

części wysokie stężenie tlenków żelaza w uzdatnianej wodzie hamuje proces biologicznego utleniania materii organicznej przez biologiczną powłokę filtracyjną w dolnej warstwie filtra. W efekcie dynamika zmniejszania wartości $ChZT$ w dolnej strefie filtra jest niższa w stosunku do dynamiki obniżania stężenia żelaza ogólnego. Utlenianie substancji organicznych przez biocenozę aktywizuje się w górnej części filtra, gdy stężenie tlenku żelaza w wodzie jest niższe. Weryfikacja powyższej hipotezy wymaga kontynuacji prowadzonych badań.

Efektywność oczyszczania wody w filtrze wstępnego oczyszczania ze złożem ziarnistym zależy od parametrów technologicznych prowadzonego procesu. Dla uwarunkowań związanych z analizowanym przypadkiem przeprowadzono badania technologiczne pozwalające dobrać parametry złoża filtracyjnego oraz prędkość filtracji. Efektywność filtra ze spienionym złożem polistyrenowym jest porównywalna do filtrów z piaskiem kwarcowym.

Przy tej samej wysokości warstwy filtracyjnej i średniej średnicy ziaren materiału filtracyjnego rozmiary filtra ze złożem polistyrenowym będą mniejsze niż rozmiary filtra z piaskiem kwarcowym. Konstrukcja filtra będzie lżejsza ze względu na znacznie mniejszą gęstość złoża polistyrenowego. Polistyren „tonie” w wodzie i ma gęstość $1,046 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Schöntag i in., 2015), ale poprzez termiczną obróbkę przy wykorzystaniu gorącej wody lub pary wodnej ulega spienieniu, tworząc złożo pływające o gęstości w granicach $0,02\text{--}0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Wielu autorów wskazuje, że zarówno na etapie inwestycji, jak i eksploatacji

złoża polistyrenowe są ekonomicznie efektywniejsze od tradycyjnych filtrów z piaskiem kwarcowym (Hirol i Trach, 2006; Schöntag i Sens, 2015; Orlov i in., 2016).

Wnioski

1. Przy zastosowaniu filtra polistyrenowego zaleca się wykonanie badań technologicznych pozwalających na wyznaczenie parametrów konstrukcyjnych i technologicznych filtra. Optymalne parametry filtra dla analizowanego zastosowania wynoszą: uziarnienie złoża polistyrenowego $d = 1,25 \text{ mm}$, prędkość filtracji $V = 7,0 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, wysokość warstwy filtracyjnej $H = 1,2 \text{ m}$, średnica złoża $D = 0,14 \text{ m}$ oraz czas trwania cyklu filtracji 12 h.
2. Zastosowanie polistyrenowego złoża filtracyjnego pozwala na uzyskanie porównywalnych lub nieco lepszych parametrów filtracji w stosunku do tradycyjnie stosowanego piasku kwarcowego. Mniejsza gęstość złoża polistyrenowego wpływa na możliwość zastosowania lżejszej konstrukcji filtra.
3. Analiza kinetyki usuwania zanieczyszczeń z podczyszczanej wody wykazała, że przy filtracji wody przez złożo polistyrenowe w kierunku od dołu do góry występują dwie strefy: w dolnej dominuje proces mechanicznego osadzania utlenionego żelaza, w górnej bardziej intensywnie następuje obniżanie stężeń $ChZT$.

Literatura

- DSTU ISO 5813:2004. Jakist' wody. Wyznaczania rozczynenoho kysniu. Jodometrycznyj metod [Jakość wody. Oznaczanie rozpuszczonego tlenu. Metoda jodometryczna].
- GOST 23268.12-78. Wody mineralnyje pitjewyje leczebnyje, leczebno-stołowyje i prirodnyje stolowyje. Miedod opriedielenija piermanganatnoj okislajemostie [Wody pitne, medyczne i stolowe. Metoda oznaczania utleniania nadmanganianu].
- GOST 3351-74. Woda pitjewaja. Miedody opriedielenija wkusa, zapacha, cwietnosti i mutnosti [Woda pitna. Metody określania smaku, zapachu, barwy i mętności].
- Hiroł, M. i Trach, Y. (2006). Analysis of pre-treatment methods for power plants of alcohol companies. *Bulletin National University of Water Management and Nature Resources Use. Collection of Scientific Papers*, 3(35), 164-171.
- Hiroł, M., Kowalski, D., Hiroł, A. i Jakimchuk, B. (2008). Przykład zastosowania filtrów ze złożem pływającym w układzie technologicznym dekarbonizacji wody rzecznej. W K. Kuś (red.), *Nowe technologie w sieciach i instalacjach wodociagowych 07. Materiały konferencyjne* (strony 343-354). Gliwice: Politechnika Śląska.
- Hiroł, M., Kowalski, D., Hiroł, A., Jakimchuk, B. i Trach, Y. (2009). Badania doświadczalne przebiegu płukania fluidalnego złoża filtru pospiesznego do oczyszczania wody. *Ochrona Środowiska*, 31(4), 35-38.
- Kiedryńska, L., Papciak, D. i Granops, M. (2006). *Chemia sanitarna*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Litwinowicz, A. (2010). Jak poprawić sprawność systemów ciepłowniczych. Sposób na wodę. *Energetyka Ciepłna i Zdrowotna*, 6, 1-7.
- MBB 081/12-0106-03. Powerchnewi, pidzemni ta zworotni wodi. Metodyka wykonannia wymiriuwani masowoji koncentracji amonij-io fotokolorymetrycznym metodom z reaktywom Neslera [Woda powierzchniowa, podziemna i powrotna. Metoda wykonywania pomiarów stężeń masowych jonów amonowych metodą fotokolorymetryczną z odczynnikiem Nesslera].
- MBB 081/12-0107-03. Powerchnewi, pidzemni tazworotni wody. Metodyka wykonannia wymiriuwani masowoji koncentracji manganu z persulfatom amoniju [Woda powierzchniowa, podziemna i powrotna. Metoda pomiaru stężenia masowego manganu metodą fotokolorymetryczną z nadsiarczanem amonu].
- MBB 081/12-0175-05. Powerchnewi, pidzemni ta zworotni wody. Metodyka wykonannia wymiriuwani masowoji koncentracji zaliza zahalnoho fotokolorymetrycznym metodom z rodanidom [Woda powierzchniowa, podziemna i powrotna. Metoda pomiaru stężenia masy żelaza metodą fotokolorymetryczną z rodankiem].
- MBB 081/12-0317-06. Powerchnewi, pidzemni ta zworotni wody. Metodyka wykonannia wymiriuwani wodnewoho pokaznyka (pH) elektrometrycznym metodom [Woda powierzchniowa, podziemna i powrotna. Metoda wykonywania pomiarów metodą elektrometryczną indeksu wodorowego pH].
- MBB 081/12-0644-09. Wody zworotni, powerchnewi, pidzemni. Metodyka wykonannia wymiriuwani masowoji koncentracji kalciju ta mahniju tytrymetrycznym metodom [Woda powierzchniowa, podziemna i powrotna. Metoda pomiaru stężenia masowego wapnia i magnezu za pomocą metody miareczkowania].
- MBB 081/12-0651-09. Wody zworotni, powerchnewi, pidzemni. Metodyka wykonannia wymiriuwani masowoji koncentracji nitrat-ioniw fotokolorymetrycznym metodom [Woda powierzchniowa, podziemna i powrotna. Metoda pomiaru stężenia masowego jonów azotanowych metodą fotokolorymetryczną].
- Orlov, V., Martynov, S. i Kunytskyi, S. (2016). Energy saving in water treatment technologies with polystyrene foam filters. *Journal of Water and Land Development*, 31(1), 119-122. doi: 10.1515/jwld-2016-0042
- PN-C-04601:1985. Woda do celów energetycznych. Wymagania i badania jakości wody dla kotłów wodnych i zamkniętych obiegów ciepłowniczych.
- PN-EN 12952-12:2006. Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze. Część 12: Wymagania dotyczące jakości wody zasilającej i wody kotłowej.
- Schöntag, J.M. i Sens, M.L. (2015). Characterization of polystyrene granules as granular media filters. *Desalination and Water Treatment*

ment, 55(7), 1712-1724, doi: 10.1080/19443994.2014.928234

- Schöntag, J.M., Pizzolatti, B.S., Jangada, V.H., de Souza, F.H. i Sens, M.L. (2015). Water quality produced by polystyrene granules as a media filter on rapid filters. *Journal of Water Process Engineering*, 5, 118-126. doi: 10.1016/j.jwpe.2015.02.001
- Totczyk, G., Okoński, R. i Boszke, L. (2012). Uzdatnianie wody podziemnej do celów kotłowych z zastosowaniem odwróconej osmozy. W M. Granops (red.), *Inżynieria i Ochrona Środowiska* (strony 229-236). Bydgoszcz: Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.
- Wytuczne SNiP II-35-76. Prawilaustrojstwa i biezopasnoj eksploatacyi parowych i wodogiejnych kotłow [Instalacje kotłowe. Zasady działania urządzenia i bezpieczna eksploatacja kotłow parowych i wodnych].
- Zhurba, M.G. (2011). Wodooczyszniye filtry spławajuszczej zagruzkoj [Filtry do wody ze złożem pływającym]. Moskwa: Association of Building Higher Educational Institutions.
- Zhurba, M.G., Govorov, O.B., Govorova, Z.M. i Kvarthenko, A.N. (2012). Biorieaktory-filtry spławajuszczej zagruzkoj w tiechnologijach kondycjonirowanija podziemnych wod [Filtry biologiczne ze złożem pływającym w technologii kondycjonowania wód gruntowych]. *Santekhnika*, 3, 50-54.

Streszczenie

Optymalizacja parametrów technologicznych filtra z granulowanym złożem polistyrenowym do uzdatniania wody kotłowej (studium przypadku). W artykule przedstawiono badania mające na celu określenie optymalnych parametrów technologicznych filtra wstępnego oczyszczania wody gorącej dla analizowanego obiegu wody kotłowej. Dla analizowanego przypadku optymalne parametry wynoszą: uziarnienie złoża polistyrenowego $d = 1,25$ mm, prędkość filtracji $V = 7,0$ m·h⁻¹, wysokość warstwy filtracyjnej $H = 1,2$ m. Zastosowanie polistyrenowego złoża filtracyjnego pozwala na uzyskanie porównywalnej efektywności uzdatniania wody w stosunku do tradycyjnie stosowanego piasku kwarcowego.

Analiza kinetyki usuwania zanieczyszczeń wykazała, że przy filtracji wody przez złożo polistyrenowe w kierunku od dołu do góry występują dwie strefy: w dolnej dominuje proces mechanicznego osadzania utlenionego żelaza, w górnej obniżanie stężenia *ChZT*.

Summary

Optimization of technological parameters of the filter with granular polystyrene bed for treatment boiler water (case study).

The article presents research to determine the optimal technological parameters of the hot water pre-treatment filter for the analyzed boiler water cycle. For the analyzed case, the optimal parameters are: the grain size of the polystyrene bed $d = 1.25$ mm, the filtration speed $V = 7.0$ m·h⁻¹, the height of the filtration layer $H = 1.2$ m. The use of a polystyrene filter bed allows obtaining comparable efficiency of water treatment in relation to the traditionally used quartz sand. Analysis of the kinetics of pollution removal showed that during filtration of water through the polystyrene bed in the direction from the bottom up there are two zones: the lower zone is dominated by the process of mechanical deposition of oxidized iron, the upper by reduction of the *COD* concentration.

Authors' address:

Yuliya Trach
(<https://orcid.org/0000-0003-2963-0500>)
Narodowy Uniwersytet Gospodarki Wodnej i Wykorzystania Zasobów Naturalnych
Katedra Wodociągów i Kanalizacji
ul. Soborna 11, 33028 Równe
Ukraine
e-mail: trach1805@gmail.com

Piotr Wichowski
(<https://orcid.org/0000-0002-9852-7884>)
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
Poland
e-mail: piotr_wichowski@sggw.pl