

**Wojciech DĄBROWSKI, Michał ZIELINA,
Barbara DĄBROWSKA, Anna WASSILKOWSKA**

*Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska
Wydział Inżynierii Środowiska,
Politechnika Krakowska*

OBLICZANIE REAKCJI RÓWNOWAGOWYCH POMIĘDZY WYKŁADZINĄ CEMENTOWĄ A PRZEPŁYWAJĄCĄ RUROCIĄGIEM WODĄ

**CALCULATION OF EQUILIBRIUM REACTIONS BETWEEN CEMENT
MORTAR LINING AND WATER FLOWING A PIPELINE**

Although a cementation is a process of improving the quality of drinking water in the long term, directly after that procedure (e.g. after the pipeline renovations) the water pH clearly raises up and in a consequence, it comes to the release of aluminum and chromium contained in the cement mortar lining. The paper presents the basic relationships between quality parameters of water and cement, and thermodynamic conditions on the one hand, and the risk of release of aluminum and chromium, one the other. More systematic investigations are needed for a better understanding of the dissolution processes of those metals just after cementation. Recently, the construction of appropriate laboratory equipment has been undertaken. A schematic drawing was presented here.

1. Wprowadzenie

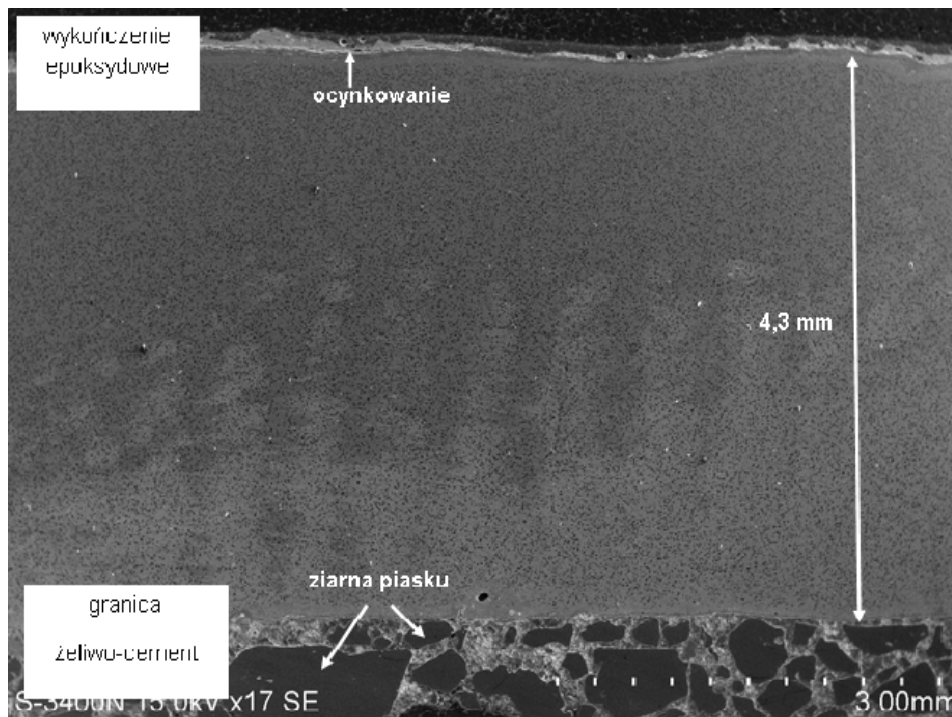
Chociaż cementowanie wodociągów jest procesem poprawiającym jakość transportowanej wody pitnej w dłuższej perspektywie dostaw, to zaraz po przeprowadzeniu tego zabiegu (np. po renowacji rur) dochodzi do wyraźnego podniesienia wartości pH wody i w konsekwencji - do rozpuszczania glinu i chromu zawartych w wykładzinie cementowej. To niepożądane zjawisko może spowodować dla wód miękkich, że nawet po wielokrotnym płukaniu i dezynfekcji przewodu stężenia glinu i chromu, tuż po uruchomieniu wodociągu, przekroczą wartości dopuszczalne dla wody pitnej. Wyplukiwanie pierwiastków z wykładziny cementowej w niektórych warunkach może mieć marginalne znaczenie, w innych zaś – katastrofalne skutki. Na szybkość reakcji wytrącania pierwiastków chemicznych wpływają takie parametry jak: pojemność buforowa wody, średnica rurociągu, długość odcinków rur poddanych cementowaniu, rodzaj cementu i sposób nakładania go oraz prędkość przepływającej wody.

Zgodnie z przepisami niemieckimi i brytyjskimi woda pitna, wprowadzona do przepłukanego i zdezynfekowanego rurociągu, powinna po 24h przetrzymania spełniać wszelkie wymagania wody przeznaczonej do spożycia, zanim rurociąg zostanie oddany do eksploatacji. Spełnienie tego wymogu może natrafiać na znaczne trudności w przypadku wód o małej pojemności buforowej i przewodów o małych średnicach.

W niniejszej pracy przedstawiono podstawowe relacje między parametrami jakościowymi wody i cementu oraz warunków termodynamicznych z jednej strony, oraz ryzyko uwalniania glinu i chromu, z drugiej. Dla lepszego zrozumienia procesów rozpuszczania tych metali tuż po cementowaniu konieczne będą bardziej systematyczne badania. W tym celu, podjęto się budowy odpowiedniego sprzętu laboratoryjnego, którego schemat został zamieszczony poniżej.

2. Parametry wody a cementowanie

Wzrost wartości pH, przepływającej rurociągiem żeliwnym bądź stalowym wody, wynika z rozpuszczania wodorotlenku wapnia, którego udział wagowy w wyprawie cementowej może dochodzić do 1% $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O ile pod względem jakości dostarczanej wody występowanie tak dużych ilości zasady wapiennej nie jest wskazane, o tyle, wysokie wartości pH wody, zawartej pomiędzy wykładziną cementową a ścianą rury (szerokość warstewki rzędu kilku mikrometrów), decydują o zahamowaniu procesów korozyjnych. Wykładzina cementowa chroni bowiem metal przed działaniem korozyjnym wody tworząc barierę termodynamiczną, a nie mechaniczną, dla jonów i rozpuszczonego tlenu. Wykładzina cementowa ma zdolność do zablizniania powstałych rys i pęknięć przez wielokrotne rozpuszczanie i wytrącanie węglanu wapnia.



Rys. 1. Przekrój przez ścianę rury żeliwnej (zgląd metalograficzny). Obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego Hitachi S-3400N.

Fig. 1. Cross-section of the ductile-iron pipe wall (metallographic sample). Image from the scanning electron microscope Hitachi S-3400N.

Budowę mineralogiczną, ziarnistość oraz skład chemiczny wykładziny z zaprawy cementowej badano mikroskopowo przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego [11]. Na rys. 1. przedstawiono zdjęcie z przekroju poprzecznego rury z żeliwa sferoidalnego. Grubość ścianki badanej rury wodociągowej wynosiła ok. 4,3-4,4 mm. Od wewnątrz rury nałożony został fabrycznie cement, a zewnętrzną powierzchnię zabezpieczono podwójną warstwą antykorozyjną. Kontrast od powłok ochronnych (np. jasny kolor ocynkowania, ciemny kolor izolacji wykończeniowej), pozwala na bezpośredni pomiar minimalnej miejscowej grubości powłok z odpowiednio powiększonych zdjęć elektrono-mikroskopowych [12]. Standardowo, podczas obserwacji struktury mikroskop elektronowy współdziała z zintegrowanym spektrometrem rentgenowskim EDS, co umożliwia pomiar zawartości pierwiastków chemicznych w wybranym mikroobszarze badanego materiału. Tym sposobem analizowano występowanie gradientów chemicznych na przekroju wykładziny cementowej [11], oraz postęp efektu wytrącani pierwiastków chemicznych z głębszych warstw wykładziny do wody pitnej.

Zdolność wody do rozpuszczania węgla wapnia, bądź do jego wytrącania z wykładziny cementowej, określona jest istotnie poprzez tzw. indeks nasycenia Langeliera (LI)

[9]. Indeks Langeliera zdefiniowany jest jako różnicę pomiędzy pH zmierzonym a pH właściwym dla równowagi dynamicznej pomiędzy rozpuszczanym i wytrącanym węglanem wapnia w postaci kalcytu. Według definicji, dla LI=0 nie powinno dochodzić ani do rozpuszczania, ani do wytrącania węglanu wapnia. W rzeczywistych warunkach jednakże, do dna i do ścian rurociągu przywierają produkty korozji i osady, charakteryzujące się naturalną porowatością. Porowatość brył, osadzających się na ścianach rurociągu, jest przyczyną miejscowego spowolnienia wymiany wody. W przypadku transportu wód miękkich, reakcje anodowe i katodowe wpływają na wartość pH i tym samym nie pozostają obojętne na równowagę węglanową. W efekcie, zerowa wartość (LI) transportowanej wody niekoniecznie oznacza równowagowe warunki dla procesów, zachodzących w porowatych warstwach przyściennych rurociągu.

Ogólnie w pracach teoretycznych, zmiany pH uzależnia się od twardości wody [2]. W większości przypadków jest to podejście słuszne, jednakże należy pamiętać, że dpH zależy od pojemności buforowej wody β ($r-e / 1/$), która z kolei jest funkcją zasadowości ogólnej Alk_T ($r-e / 2/$). Pojemność buforowa wody zdefiniowana jest poprzez wartość bezwzględną pochodnej stężenia C silnego kwasu jednoprotonowego lub silnej zasady z jedną grupą hydroksylową C względem zmian pH, które wystąpiły po dodaniu tego kwasu lub zasady [4-6]:

$$\beta = \left| \frac{dC}{dpH} \right| \quad (1)$$

Przykładowo, dla wód naturalnych wartość pojemności buforowej można obliczyć z równania:

$$\beta = 2,3 \left\{ \frac{\alpha_1 ([0,5Alk_T] - [OH^-] + [H_3O^+]) \left([H_3O^+] K_1' K_2' / ([H_3O^+] + 4K_2') \right)}{[K_1' (1 + 2K_2' / [H_3O^+])] + [H_3O^+] + [OH^-]} \right\}, \quad (2)$$

w którym wprowadzono następujące oznaczenia [10, 1]:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\frac{[H_3O^+]}{K_1'} + 1 + \frac{K_2'}{[H_3O^+]}} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\frac{[H_3O^+]^2}{K_1' K_2'} + \frac{[H_3O^+]}{K_2'} + 1} \quad (4)$$

W równaniach /3/ i /4/, α_1 i α_2 oznaczają odpowiednio, części wodorowęglanów i węglanów, w całkowitym węglu nieorganicznym. Ponadto:

$$K_1' = \frac{K_1}{f_m} = \frac{[H_3O^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} \quad (5)$$

$$K_2' = \frac{K_2}{f_d} = \frac{[H_3O^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]}, \quad (6)$$

gdzie:

f_m i f_d – współczynniki aktywności odpowiednio, jonów jedno i dwuwartościowych; K_1 i K_2 – stałe dysocjacji kwasu węglowego odpowiednio, pierwszorzędowa i drugorzędowa. Wartości stałych wyznaczone są tak, aby stężenie kwasu węglowego $[H_2CO_3^*]$

oznaczało sumę stężenia rozpuszczonego dwutlenku węgla oraz kwasu węglowego po przeliczeniu tej sumy na kwas węglowy.

Pojemność buforowa wody zależy zatem od zasadowości ogólnej (Alk) i wartości pH. Przy tej samej wartości pH, większa zasadowość wody oznacza większą pojemność buforową. W dużym przybliżeniu, zasadowość ogólną (przy ustalonej temperaturze) wyznaczyć można z równania:

$$\text{Alk}_T = 0,5[\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + 0,5[\text{OH}^-] - 0,5[\text{H}_3\text{O}^+] \quad (7)$$

Z równania /7/ wynika, że zasadowość ogólna Alk_T wzrasta wraz ze wzrostem stężenia wodorowęglanów $[\text{HCO}_3^-]$, a przy wysokich wartościach pH –wraz ze wzrostem stężenia węglanów $[\text{CO}_3^{2-}]$ w wodzie. Ponieważ aniony w roztworze wodnym są w równowadze z kationami, a do nich należą między innymi jony metali dwuwartościowych, stąd w wielu przypadkach nie popełnia się znacznego błędu uważając, że wody twarde mają dużą pojemność buforową. Zauważmy jednak, że dla wód o twardości nieprzemijającej można w ten sposób popełnić grubo błąd. Dlatego, w analizie parametrów jakościowych wody i ich wpływu na wzrost pH zaraz po zabiegu cementowania (a w efekcie - na rozpuszczanie glinu z wykładziny cementowej do wody), powinno się operować wartością pojemności buforowej (lub co najmniej zasadowością ogólną), a nie twardością wody.

3. Naprężenia ścinające

W kanalizacji, minimalne spadki kanałów dobiera się często w oparciu o najmniejsze dopuszczalne wartości średnich naprężeń ścinających τ na granicy ściany kanału i przepływających ścieków. Opisuje je równanie:

$$\tau = R_h \rho g S, \quad (8)$$

w którym:

- R_h - promień hydrauliczny [m],
- ρ - gęstość ścieków (wody) $[\text{kg}/\text{m}^3]$,
- g - przyspieszenie ziemskie $[\text{m}/\text{s}^2]$,
- S - spadek kanału,
- τ - naprężenie ścinające $[\text{N}/\text{m}^2]$.

Dla ruchu równomiernego, w równaniu /8/ można porównać pracę wykonaną przez siły ścinające ze stratą energii potencjalnej przepływających ścieków. W przypadku przewodów wodociągowych (przy założeniu przepływu ustalonego), praca sił ścinających jest odpowiednio równa zmniejszeniu energii potencjalnej strumienia wody.

Pojawiają się jednak dwie istotne różnice. Po pierwsze, przekrój przewodu rurowego jest całkowicie wypełniony wodą, a więc $R_h = 0,25D$, gdzie D jest średnicą wewnętrzną rury (w przewodach żeliwnych, D jest zarazem średnicą nominalną przewodu: $D=D_N$, lecz w stalowych - nie zawsze). Po drugie, przewód wodociągowy może nie tylko obniżać swoje położenie, ale również wznosić się lub być poprowadzony niemal poziomo. Zależnie od nachylenia odcinka rurowego względem kierunku przepływu, ciśnienie w przewodzie wzrasta lub się obniża. Dla stałej średnicy przewodu i ustalonego przepływu, energia kinetyczna strumienia wody nie zmienia się na długości przewodu. Stąd praca sił ścinających równa jest całkowitemu zmniejszeniu energii potencjalnej. Ostatecznie, dla przewodów wodociągowych równanie /8/ przyjmuje postać:

$$\tau = 0,25D\rho g S_h \quad (9)$$

W równaniu /9/, S_h jest hydraulicznym spadkiem wywołanym oporami przepływu. Wartość spadku hydraulicznego równa jest $\Delta h_{\text{rozp}} / L$, gdzie: Δh_{rozp} jest zmianą wysokości ciśnienia, wywołaną oporami przepływu, na jednostce długości rurociągu L . W żargonie wodociągowym często mówi się o stracie energii na opory ruchu, ale pamiętajmy, że termodynamika nie zna takiego pojęcia, gdyż energia nie może być tracona (zmienia tylko postać). Ogólnie, zmianę wysokości ciśnienia podana jest równaniem Darcy'ego-Weisbacha:

$$\Delta h_{\text{rozp}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (10)$$

gdzie: v oznacza średnią prędkość przepływu w przekroju poprzecznym rury; λ -współczynnik z wykresu Moodiego, zależny dla ruchu laminarnego jedynie od liczby Reynoldsa (Re), dla ruchu przejściowego - zarówno od (Re), jak i od względnej zastępczej chropowatości piaskowej, a dla ruchu burzliwego - wyłącznie od tej chropowatości.

W równaniu /10/, średnica wewnętrzna przewodu D jest w mianowniku. Natomiast, w równaniu /9/, średnia wartość naprężenia ścinającego na granicy ściany przewodu i przepływającej wody jest wprost proporcjonalna do D . W konsekwencji, im mniejsza jest średnica rury tym mniejsza jest ekonomiczna prędkość przepływu - za to, odpowiednie spadki hydrauliczne ciśnienia będą większe.

Można się spodziewać, że uwalnianie glinu i chromu w przewodach świeżo po cementowaniu zależy nie tylko od składu chemicznego wyprawy cementowej i jakości przepływającej wody, ale również od wartości naprężeń ścinających. Określenie wartości tych naprężeń powinno być poprzedzone dokładnym opracowaniem zagadnienia, jak np. rozpoznaniem, w których przewodach prowadzone są zabiegi cementowania na budowie.

4. Efektywność ekonomiczna cementowania

Przewody kanalizacyjne prowadzone są w terenach miejskich pod jezdniami, przewody kanalizacyjne magistralne - pod terenami zielonymi, a rozdzielcze - pod chodnikiem, i to możliwie minimum 1 m od krawężnika. Tak więc zastosowanie wykopowych metod renowacji kanalizacji wymaga organizacji objazdów, a przewodów wodociągowych - zazwyczaj nie. Z uwagi na konieczność odprowadzenia ścieków z budynków położonych dalej od ulicy i z dużych spadków przy kanalików (wymagane 1,5%, a zalecane - 2%), grawitacyjna kanalizacja sanitarna i ogólnospławna ułożona jest na głębokości większej niż 2,3-2,5 m. Na terenach płaskich zagłębienia kanałów mogą być znacznie większe i na przykład, w najgłębszych miejscach w Krakowie, przekraczają 7m.

Tymczasem, przewody wodociągowe posadowione są zazwyczaj ok. 30cm poniżej głębokości przemarzania, wyszczególnionych w wymaganiach technicznych [3]. Ponadto pomimo licznych metod renowacji, które można stosować zarówno dla wodociągów jak i dla kanalizacji, oferta dotycząca tych metod renowacji, które dostosowano wyłącznie do beżeciśnieniowych przewodów kanalizacyjnych jest bogata [8]. Wreszcie, wykonanie przeglądu stanu technicznego przewodów wodociągowych za pomocą kamery przemysłowej wymaga demontażu armatury, a w kanalizacji - zdjęcia włazu oraz wyczyszczenia kanału. Z wymienionych przyczyn, metody bezwykopowe okazują się być efektywne finansowo znacznie częściej w kanalizacji, niż w wodociągach.

Cementowanie, jako najtańszy i jedyny sposób renowacji rur żeliwnych i stalowych, sprzyja zahamowaniu procesów korozji poprzez utrzymanie odpowiednich warunków termodynamicznych na granicy wykładziny cementowej z przepływającą wodą. Analiza ekonomiczna pokazuje wyraźnie, że opłacalność cementowania w odniesieniu do kosztów odbudowy wodociągu rośnie wraz ze wzrostem średnicy odnawianego przewodu i stopniem urbanizacji terenu. Dlatego w praktyce, zabieg cementowania stosowany jest przeważnie do przewodów o dużych średnicach, a do małych średnic - jedynie tam, gdzie warunki prawno-własnościowe lub względy ochrony środowiska są czynnikami decydującymi.

5. Wartości naprężeń

Aby określić, jak duże naprężenia ścinające działają w konkretnym przewodzie wodociągowym, należy dokonać odpowiednie obliczenia lub oszacowania spadków hydraulicznych, wynikających z oporów przepływu wody. Zakładając, że zabieg cementowania przeprowadzono według sztuki oraz, że powierzchnia wykładziny została odpowiednio wygładzona (przesuwając za maszyną natryskującą specjalne urządzenie, nazywane w języku angielskim „drag towel”), można posłużyć się bazą danych, sporządzoną dla kilkudziesięciu przewodów zbadanych od momentu instalacji do 80 lat po cementowaniu. W szczególności, wartościami stałej Hazeny-Williamsa, występującej we wzorze na zmianę wysokości ciśnienia wywołaną oporami ruchu [w stopach na 100 stóp długości przewodu]:

$$\Delta h_{\text{rozp}} = 0,2083 (100/c)^{1,852} q^{1,852} / D^{4,8655} \quad (11)$$

Wzór Hazeny-Williamsa [11] zawiera również wartość natężenia przepływu q [w galonach na minutę]. Zatem, im większa wartość przyjmuje stała c , tym mniejsze będą opory przepływu. Niestety, bezpośrednie przeliczenie wartości c na chropowatość względną ze wzoru Colebrooka –Whitea nie jest możliwe. Dane, otrzymane na podstawie kilkudziesięciu pomiarów, pozwalają w przybliżeniu przyjąć, że stała c odpowiada wartości zastępczej chropowatości piaskowej $k = 0,12\text{mm}$, z możliwością wzrostu w ciągu 80 lat o 20% [7].

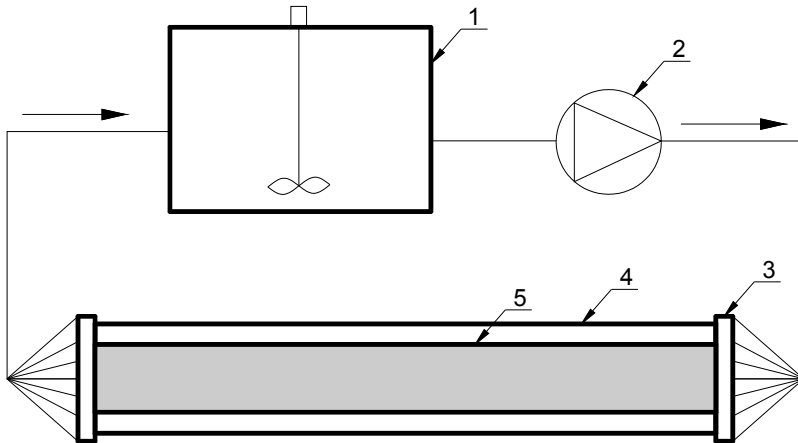
Nie jest to duża wartość. Wyznaczenie prędkości ekonomicznej opiera się na minimalizacji funkcji celu, opisującej całkowite koszty budowy i eksploatacji rurociągu, ponadto było kilka razy rozwiązane w ciągu ostatnich dziewięćdziesięciu lat. Niestety, dynamicznie zmieniające się ceny materiałów, a przede wszystkim energii, nie pozwalają na jednoznaczne wyznaczenie ich wartości. Biorąc następujące przykłady:

- a) dla rurociągu żeliwnego z wyprawą cementową o średnicy wewnętrznej 300 mm: ekonomiczny spadek hydrauliczny 8 promili i opory miejscowe jako 30% oporów na jednostce długości L ,
- b) dla przewodu magistralnego o średnicy 1400 mm: ekonomiczny spadek hydrauliczny 2 promile, opory miejscowe w wysokości 30% oporów na długości,

otrzymamy zaskakująco wąski zakres wartości naprężenia ścinającego: od $5,9 \text{ N/m}^2$ do $6,9 \text{ N/m}^2$. We własnym stanowisku laboratoryjnym, opisanym poniżej, przyjęto wartości naprężeń ścinających w zakresie od 5 N/m^2 do 7 N/m^2 .

6. Konstrukcja stanowiska badawczego

Podjęto budowę własnego stanowiska badawczego, złożonego z dwóch współśrodkowo ustawionych rur żeliwnych o połączeniach kołnierzowych, jak pokazano schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Stanowisko badawcze z dwóch współśrodkowo ustawionych rur żeliwnych: (1 - zbiornik z mieszadłem i odpowietrzeniem, 2 - pompa cyrkulacyjna, 3 - dopływ, 4 - zewnętrzny przewód rurowy, 5 - wewnętrzny przewód rurowy).

Fig. 2. The laboratory equipment of two concentrically arranged ductile-iron pipes: (1 - a tank with a mixer and an air valve, 2 - circulation pump, 3 - inflow, 4 - external pipe, 5 - inner pipe).

W stanowisku badawczym, przepływ odbywa się pomiędzy dwoma rurami z których większa, o średnicy wewnętrznej D_w , ma wyprawę cementową założoną od wewnątrz, a mniejsza, o średnicy zewnętrznej D_z - wyprawę zewnętrzną. Średnia wartość naprężenia stycznego na granicy ściana przewodu/woda określana jest z równania /12/, a wartość liczby Reynoldsa - równaniem /13/:

$$\tau = R_h \rho g S_h = 0,25(D_w - D_z) \rho g S_h \quad (12)$$

$$Re = \frac{4R_h v}{\nu} = \frac{4Q}{\pi(D_w + D_z)\nu} \quad (13)$$

W równaniach /12/ i /13/ wprowadzono następujące oznaczenia:

D_w - średnica wewnętrzna przewodu większego [m],

D_z - średnica zewnętrzna przewodu mniejszego [m],

v - prędkość przepływu [m/s],

ν - kinematyczny współczynnik lepkości wody [m²/s],

Q - natężenie przepływu [m³/s].

Szczelinę przyjmuje się na tyle wąską, a prędkość przepływu wody - na tyle dużą, aby naprężenie ścinające osiągnęły zadaną wartość przy zachowaniu laminarności ruchu, który zapewnia ustalone w czasie wartości naprężeń ścinających oraz pełną nad nimi kontrolę. Podczas eksploatacji przewodów o dużych średnicach występuje ruch przejściowy, zbliżony do turbulentnego, ale przy laminarnych warunkach przepływu $Re < 2320$, co pozwala na pełną kontrolę wartości τ podczas eksperymentów. Dopływająca do zbiornika woda jest mieszana w celu wyrównania stężeń zanieczyszczeń, co w pewnym sensie odpowiada naturalnemu mieszanemu przepływu wody przy przepływie przez rurę w warunkach ruchu turbulentnego.

Aby zachować iloraz powierzchni wyprawy cementowej do objętości wody w układzie równej $D/4$ (wartość odpowiednia dla rurociągów; po pominięciu ilości wody znajdującej się poza zbiornikiem), wymagana objętość zbiornika wynosi:

$$V = 0,25D\pi(D_w + D_z)L_m, \quad (14)$$

gdzie: L_m - długość modelu, złożonego z dwóch współśrodkowych przewodów rurowch, pomiędzy płaszczyznami których przepływa woda.

Oczywiście, w bardziej szczegółowym bilansie masy możemy nie uwzględniać wody wypełniającej pierścien pomiędzy rurami, rurociągi łączące i pompę. Dzięki sekwencyjnej budowy zbiornika, możliwe jest bowiem „wymknięcie” części objętości. W tym układzie można badać zjawisko uwalniania zanieczyszczeń z wyprawy cementowej dla różnych wartości średnicy przewodu. Po przepompowaniu przez pompę cyrkulacyjną objętości wody V_{przep} , woda nabiera takiej jakości, jak po przepłynięciu rurociągiem o średnicy D i długości $L = V_{przep}/V_{zb}$ z prędkością, przy której naprężenia ścinające są takie, jak na ścianach rur współśrodkowych w stanowisku badawczym (rys. 2).

7. Wnioski

Cementowanie rurociągów w dłuższym okresie czasu przyczynia się do poprawy jakości transportowanej przewodami żeliwnymi wody pitnej. Jednakże, zaraz po cementowaniu, jak i po położeniu nowego przewodu żeliwnego, podnosi się znacznie wartość pH wody, a to powoduje rozpuszczanie glinu i chromu. Stężenia tych pierwiastków mogą być szczególnie wysokie, gdy woda charakteryzuje się niską pojemnością buforową, a cementowany odcinek ma małą średnicę. Niską pojemność buforową mają wody o niskiej zasadowości ogólnej. Zazwyczaj są to wody miękkie, dlatego uważa się, że wody twarde nie stanowią takiego zagrożenia. W większości przypadków jest to opinia słuszna, a ściślej dla tych wód, w których twardość jest przemijająca (to znaczy zanikająca wraz ze wzrostem pH lub temperatury). W wodach tych, kationy wapnia i magnezu pozostają w równowadze z wodorowęglanami, a dla wysokich wartości pH - z węglanami.

8. Podziękowanie

Praca naukowa została sfinansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy 2648/B/T02/2010/39.

Bibliografia

- [1] Benefield L. D., Judkins J. F., Weand B. L. 1982. Process chemistry for water and wastewater treatment. Prentice-Hall, Inc. Englewoods Cliffs. New Jersey Benefield, Judkins, Weand 1982
- [2] Buchta R., Carbonate equilibrium in drinking water mixtures, PhD. Dissertation, Cracow University of Technology, Kraków, 1998, (in Polish)
- [3] COBRI Instal, Warunki Techniczne wykonania i odbioru sieci kanalizacyjnych – Wymagania Techniczne – zeszyt 9
- [4] Dąbrowski W., Buchta R., Mackie R.I., 2004, Impact of water blending on calcium carbonate equilibrium in water distribution systems – technical note, Journal of Environmental Engineering, ASCE, September, 130,9,1059-1062
- [5] Dąbrowski W., Zielina M., Kaniewski J., Gajewski A., 2004, Difference between buffer capacities of water flowing through land of various geological origin, XXI Congresso Nazionale di Merceologia con partecipazione internazionale, Fioggia, 22-24 September,(CD-Rom edition)
- [6] Dąbrowski W., Buchta R., 2000 Statistical evaluation of calcium carbonate equilibrium in natural water, Lakes&Reservoirs: Research and Management, 5, 99-104.
- [7] Grandpierre, M. 1986. Ductile iron pipe compendium. Pont-a-Mousson, Nancy, France.
- [8] Kuliczkowski A., Kuliczowska E., Zwierzchowska A., Zwierzchowski D., Dańczuk P., Kubicka U., Kuliczkowski P., Lisowska J., Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska, Seidel-Przywiecki sp. z o.o., 2010.
- [9] Langelier W.F., The analytical control of anti-corrosion water treatment. Journal AWWA. 28(10):1500, 1936.
- [10] Stumm W., Morgan J.J., 198, Aquatic chemistry 2nd edition. Wiley. New York.
- [11] Wassilkowska, A., Dąbrowski, W.: Zastosowanie mikroskopii elektronowej do badania rur żeliwnych – część I – Struktura wykładziny z zaprawy cementowej, Gaz, Woda i Technika Sanitarna 4 (2012) 154-159.
- [12] Wassilkowska, A., Dąbrowski, W.: Zastosowanie mikroskopii elektronowej do badania rur żeliwnych – część II – Zabezpieczenia zewnętrzne oparte na cynkowaniu, Gaz, Woda i Technika Sanitarna 5 (2012) 206-211.