

Wpływ struktury ośrodka gruntowego na strefę rozptyłu zaczynu uszczelniającego w procesie iniekcji otworowej

# Technologie iniekcyjne na każdy grunt

Stanisław Stryczek\*, Katarzyna Jurczyszak-Pawlica\*\*

**W**raz z rozwojem budownictwa w szerokim tego słowa znaczeniu, grunty o właściwych parametrach geotechnicznych występują coraz rzadziej. Inwestycje lokalizowane są coraz częściej na terenach, gdzie liczba problemów geotechnicznych, wynikających z trudnych warunków gruntowych, jest bardzo duża. Dotyczyć one mogą m.in. [1, 2, 3] posadowienia obiektów, zabezpieczenia wykopów (płytkich wyrobisk górniczych), możliwości wystąpienia (uaktywnienia) zjawisk geodynamicznych, występowania nieciągłości fizycznej ośrodka, dopływów wód gruntowych i złożowych.

Każdy rodzaj działalności inżynierskiej prowadzonej w takich warunkach posiada własną specyfikę, jednak wszystkie łączy wysoki stopień komplikacji i wymagań stawianych zarówno projektantom i wykonawcom, jak i stosowanym technologiom. Rezultatem dążenia do minimalizacji ryzyka związanego z problemami geotechnicznymi jest dynamiczny rozwój specjalistycznych technologii, które charakteryzują się niezawodnością, uniwersalnością oraz wysoką wydajnością [4, 5].

## Wzmacnianie i uszczelnianie ośrodka gruntowego metodą iniekcji otworowej

Technologie wzmacniania gruntów można najogólniej podzielić na dwie grupy [3, 6, 11]:

- wzmacnianie mechaniczne (bez stosowania materiałów dodatkowych). W przypadku gruntów ziarnistych (piasek, żwir) zagęszczanie jest uzyskiwane przez ubijanie lub wibrowanie, natomiast w przypadku gruntów spoiw (gliny, ropy) – w wyniku wstępnego obciążenia gruntu nasypem lub zastosowania próżni, co znacznie przyspiesza proces konsolidacji gruntu w stosunku do często stosowanego drenażu;

- wzmacnianie fizyko-chemiczne (z zastosowaniem materiałów dodatkowych). W słabsze warstwy ośrodka gruntowego wprowadzany jest dodatkowy materiał (suchy niespoisty lub na osnowie spoiw). Jedną z możliwości w tej grupie wzmacniania i uszczelniania gruntów jest metoda iniekcji, zwłaszcza typu otworowego, lub pionowych przesłon wodoszczelnych (przeciwfiltracyjnych), polegających na zastosowaniu odpowiednich zaczynów uszczelniających. Efekty prac iniekcyjnych zależą w dużej mierze od [7, 8, 9] rodzaju gruntu; właściwości fizycznych, mechanicznych, strukturalnych, chemicznych ośrodka gruntowego; zastosowanej metody iniekcji otworowej; techniki i technologii procesu wtlaczania zaczynu uszczelniającego; parametrów technologicznych, a zwłaszcza reologicznych zatłaczanego zaczynu uszczelniającego.

Fizyczne właściwości gruntu zależą głównie od rodzaju, kształtu i wymiarów ziaren. Jedną z ważniejszych charaktery-

styk gruntu jest współczynnik porowatości „n”. Dla ziaren o jednakowej średnicy porowatości mieści się w granicach  $0,259 < n < 0,476$ .

Orientacyjne współczynniki porowatości wynoszą: dla piasku  $n = 0,30$  do  $0,45$ ; dla gliny  $n = 0,04$  do  $0,55$ ; dla torfu  $n = 0,60$  do  $0,80$ . W zależności od struktury gruntu występują różnie ukierunkowane właściwości hydrauliczne, mogące być wyrażone za pomocą współczynnika filtracji  $K_f$ . Współczynnik ten zależy od [10, 11]: właściwości fizycznych ośrodka gruntowego (uziarnienia, porowatości, struktury i tekstury) oraz właściwości przepływającej cieczy przez grunt (temperatury, składu chemicznego).

Przy projektowaniu prac związanych z uszczelnianiem i wzmacnianiem ośrodka gruntowego należy uwzględnić m.in. [1, 5, 12] procesy zachodzące przy wzajemnym oddziaływaniu obiektu inżynierskiego i gruntu, prognozy geologiczno-inżynierskie pod kątem możliwości wystąpienia zarówno ilościowego, jak i jakościowego oddziaływania procesów natury geologicznej na realizowany, a następnie eksploatowany obiekt inżynierski.

## Iniekcja klasyczna przez penetrację

Iniekcję klasyczną można stosować jedynie w przypadku ośrodka praktycznie przepuszczalnego dla wody, tj. o współczynniku filtracji większym od  $10^{-3}$  m/s. Zaczynu wprowadza się przez rury iniekcyjne z perforacją lub rury z otwartym końcem lub przez nieuzbrojone otwory. Po utwardzeniu się zaczynów, powstają bryły ze związanego ośrodka gruntowego. Kształt tych brył zależy od uwarstwienia ośrodka i warunków hydraulicznych iniekcji [5, 8, 11].

Wtlaczanie zaczynów uszczelniających w ośrodek gruntowy można sprowadzić do następujących przypadków:

- wtlaczanie zaczynów uszczelniających przez perforowany przewód iniekcyjny w warstwę gruntu przepuszczalnego ograniczoną dwiema warstwami nieprzepuszczalnymi, przy czym długość czynna powierzchni otworu iniekcyjnego równa jest miąższości warstwy przepuszczalnej. W półprzestrzeni środowiska powstają wówczas zeskalone bryły w kształcie wałców z dnami płaskimi (rys. 1a);

- wtlaczanie zaczynów przez perforowany przewód iniekcyjny w warstwę przepuszczalną o miąższości większej od długości czynnej powierzchni otworu iniekcyjnego. Przypadek ten prowadzi do wytworzenia w półprzestrzeni wałców z dnami wypukłymi (rys. 1b);

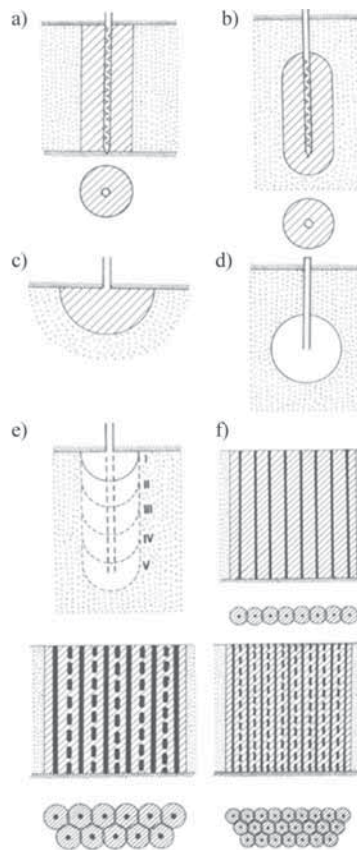
- wtlaczanie zaczynów przez przewód iniekcyjny z otwartym końcem usytuowanym na kontakcie warstwy izolującej z warstwą przepuszczalną, w wyniku czego tworzą się bryły w kształcie wycinka kuli (rys. 1c);

- wtlaczanie zaczynu uszczelniającego przez przewód iniekcyjny z otwartym końcem w nieograniczoną warstwę

przepuszczalną. Powstaje wtedy kuliasta bryła, której środkiem jest otwarty koniec przewodu (rys. 1d);

- iniekcja odbywa się przez otwór iniekcyjny, który przewiercił poprzednią strefę iniekcyjną (rys. 1c). Metodę tę stosuje się wówczas, gdy nie można jednorazowo przewiercić całej strefy przeznaczonej do iniekcji; w końcowym etapie iniekcji bryła zeskalonego ośrodka ma kształt słupa w formie walca, tak jak w przypadku 1b);

- iniekcja odbywa się przez otwory iniekcyjne według schematu „a”, otwory, te mogą być wiercone w jednym, dwóch lub trzech rzędach. W wyniku prac iniekcyjnych uzyskuje się szczelną ściankę, tzw. ekran przeciwfiltracyjny (rys. 1f).



Rys. 1. Schematy zeskalonego górotworu metodą iniekcji otworowej [11]

Zeskalone bryły o kształcie pokazany na rysunku 1 mogą powstać tylko w środowisku jednorodnym. Prace iniekcyjne w ośrodku gruntowym uwarstwowionym prowadzą do deformacji brył, przy czym zasięg promienia uszczelnienia (strefa rozptyłu zaczynu) zależy od porowatości i współczynników filtracji poszczególnych warstw udostępnionych otworem iniekcyjnym.

Deformację kształtu brył wywołuje też przepływ wody przez iniektowany ośrodek. Według badań modelowych były już wytworzone, lecz jeszcze niezwiązane, mogą zostać znowu całkowicie rozmyte.

#### Określenie promienia iniekcji (strefy rozplywu)

Obliczenie procesu iniekcji polega przede wszystkim na określeniu zasięgu penetracji (strefy rozplywu) zaczynu uszczelniającego, tzw. promienia iniekcji (R). W literaturze można znaleźć różne empiryczne wzory przeznaczane do obliczania promienia iniekcji zaczynów wtłaczanych w grunty sypkie. Najczęściej wymieniane są wzory E. Maaga, R. Haefeli oraz T.S. Karanfilowa [5, 11].

W celu określenia promienia iniekcji wyróżnić można dwa przypadki: iniekcję zaczynów uszczelniających przez rury iniekcyjne z otwartym końcem oraz iniekcję przez rury z perforacją.

W przypadku użycia rur iniekcyjnych z otwartym końcem, promień iniekcji można obliczyć według E. Maaga wzorem [5]:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3K_f \cdot \frac{v_w}{v_z} \cdot T \cdot H \cdot r}{n}}, \quad [m] \quad (1)$$

gdzie:

- R – promień iniekcji [m],
- $K_f$  – współczynnik filtracji [m/s],
- $v_w$  – lepkość kinematyczna wody [m<sup>2</sup>/s],
- $v_z$  – lepkość kinematyczna zaczynu uszczelniającego [m<sup>2</sup>/s],
- T – czas iniekcji [s],
- H – ciśnienie hydrostatyczne słupa wody [m],
- r – promień rury iniekcyjnej [m],
- n – ułamek porowatości gruntu.

Zależności  $v_w$  i  $v_z$ :

$$v_w = \frac{\eta_{pw}}{\rho_w}, \quad [m^2/s]$$

$$v_z = \frac{\eta_{pz}}{\rho_z}, \quad [m^2/s]$$

gdzie:

- $\eta_{pw}$  – lepkość plastyczna cieczy wypełniającej górotwór, [Pa · s],
- $\rho_p$  – gęstość cieczy wypełniającej górotwór [kg/m<sup>3</sup>],
- $\eta_{pz}$  – lepkość plastyczna zaczynu uszczelniającego [Pa · s],
- $\rho_z$  – gęstość zaczynu uszczelniającego [kg/m<sup>3</sup>].

Zasięg iniekcji prowadzonej przez rury z perforacją według R. Tafeli określa wzór [5, 11]:

$$R = \sqrt{\frac{2K_f \cdot v_w}{v_z} \cdot H \cdot T \cdot \frac{x}{r \cdot \ln \frac{x}{r}}}, \quad [m] \quad (2)$$

Za „x” R. Tafeli przyjął długość promienia rozchodzenia się zaczynu uszczelniającego, przy którym ciśnienie zatłoczenia zaczynu w gruncie powoduje jeszcze obserwowalną zmianę ciśnienia złożowego pa-

nującego w warstwie. Dokładne określenie wartości „x” jest w bardzo trudne. Biorąc jednak pod uwagę, że „x” i „r” znajdują się pod znakiem logarytmu, błąd w oszacowaniu „x” będzie miał nieznaczny wpływ na wynik obliczeń zasięgu rozchodzenia się zaczynu w ośrodku gruntowym.

T.S. Karanfilow zaleca do obliczania promienia iniekcji zaczynów wtłaczanych w grunt przez rury z perforacją wzór w postaci [5]:

$$R = \sqrt{\frac{0,64 \cdot K_f \cdot \frac{v_w}{v_z} \cdot H \cdot T}{\beta n}}, \quad [m] \quad (3)$$

gdzie:

- $\beta$  – stopień zapelnienia zaczynem uszczelniającym przestrzeni międzyziarnowych.

Obliczenia związane z określeniem promienia iniekcji (strefy rozplywu zaczynu) zostały dokonane dla dwóch przypadków technologicznych, tzn. dla perforowanych rur iniekcyjnych oraz dla rur iniekcyjnych z otwartym końcem.

Dla każdego z wymienionych wyżej przypadków technologicznych uwzględniono wpływ następujących czynników na wielkość promienia iniekcji: współczynnik filtracji  $K_f$ , porowatość gruntu n, ciśnienie iniekcji H, gęstość zaczynu  $\rho_{zc}$ , właściwości reologiczne zaczynu:  $\eta_p, v_z, v_w$ .

A) Wartościami stałymi dla każdego rozpatrywanego przypadku były:

- czas iniekcji – T = 1800 [s];
- promień rozchodzenia się zaczynu powoduje jeszcze spostrzegalną zmianę ciśnienia złożowego danej warstwy – x = 2 [m];
- lepkość kinematyczna cieczy wypełniającej ośrodek gruntowy –  $v = 1 \cdot 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s];
- promień przewodu iniekcyjnego r = 0,0365 m (dz = 2 7/8 ”).

B) Zmiennymi czynnikami fizyko-technicznymi w obliczeniach promienia iniekcji były:

a) współczynnik filtracji  $K_f$  [m/s] i porowatość gruntu n [-] dla różnego ośrodka gruntowego przyjęto:

- 1) rumosze, żwiry gruboziarniste:
 

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| $K_f = 1,0$ [m/s] | $K_f = 1,0$ [m/s] |
| n = 0,5           | n = 0,3           |
- 2) żwiry drobnoziarniste:
 

|                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| $K_f = 1 \cdot 10^{-1}$ [m/s] | $K_f = 1 \cdot 10^{-1}$ [m/s] |
| n = 0,4                       | n = 0,25                      |
- 3) piaski gruboziarniste:
 

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| $K_f = 1 \cdot 10^{-2}$ [m/s] |  |
| n = 0,4                       |  |
- 4) piaski różnoziarniste:
 

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| $K_f = 1 \cdot 10^{-3}$ [m/s] |  |
| n = 0,35                      |  |

- b) gęstości zaczynu –  $\rho_{zc}$  [kg/m<sup>3</sup>]
 

|                           |
|---------------------------|
| 1800 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 1700 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 1600 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 1500 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 1400 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 1300 [kg/m <sup>3</sup> ] |

- c) lepkości plastyczne –  $\eta_p$  [Pa · s]
 

|                 |
|-----------------|
| 0,10 [Pa · s],  |
| 0,04 [Pa · s],  |
| 0,015 [Pa · s], |
| 0,009 [Pa · s], |
| 0,005 [Pa · s], |
| 0,003 [Pa · s], |

- d) ciśnienie iniekcji – H [mH<sub>2</sub>O]:
 

|                     |
|---------------------|
| 20 [m] – 0,2 [MPa], |
| 40 [m] – 0,4 [MPa], |
| 60 [m] – 0,6 [MPa], |
| 80 [m] – 0,8 [MPa], |
| 100 [m] – 1 [MPa],  |

W tabelach 1–6 (str. 36-37) przedstawiono wyniki obliczonych promieni iniekcji w zależności od założonych warunków: geologicznych (kf, n); technologicznych (H,  $\rho_{zc}, v_{zc}, v_w, r$ ). Na podstawie analizy wszystkich wyników wynika, że każdy z wymienionych czynników ma wpływ na zasięg rozchodzenia się zaczynu uszczelniającego w iniektowany ośrodek gruntowy.

Reasumując można zatem stwierdzić, że dla każdego przypadku prac geoinżynierskich związanych z wykorzystaniem ekranów przeciwfiltracyjnych, należy indywidualnie dobierać technologię iniekcji z uwzględnieniem istniejących warunków geologicznych i hydrogeologicznych.

#### Wnioski

Dla każdego przypadku związanego z uszczelnianiem i wzmacnianiem ośrodka gruntowego należy indywidualnie dobierać technologię iniekcji z uwzględnieniem:

- istniejących warunków geologicznych i hydrogeologicznych,
- parametrów technologicznych, a zwłaszcza reologicznych zaczynów uszczelniających,
- rodzaju przewodu iniekcyjnego,
- fizycznych i strukturalnych właściwości ośrodka gruntowego,
- optymalnych wartości ciśnienia iniekcji (wyeliminowanie możliwości szczelinowania ośrodka).

#### Bibliografia:

1. K Gradkowski, S. Żurawski, *Budowle i roboty ziemne*, Politechnika Warszawska, 2003.
2. M. Gryczmański, *Współczesne kierunki rozwoju geotechniki w Polsce*, „Inżynieria i Budownictwo”, 1994, nr 8.
3. M. Marjańska, A. Franków, *Nowoczesne metody wzmacniania gruntów*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2004, nr 6.
4. T. Michalski, P. Krzykowski, *Techniki iniekcyjnego wzmacniania podłoża*, „Inżynieria i Budownictwo”, 1997, nr 12.
5. W. Miłkowski, E. Gliwa, P. Szedel, *Wzmacnianie i uszczelnianie górotworu środkami chemicznymi*, Wydawnictwo Śląsk, 1982.
6. S. Stryczek, A. Gonet, R. Wiśniowski, *Geoinżynieria jako dyscyplina nauk technicznych – alternatywa dla tradycyjnych metod*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie”, 2005, nr 1.
7. S. Stryczek, A. Gonet, R. Wiśniowski, *Kierunki rozwoju metod geoinżynierskich*, *Zeszyty Naukowe AGH „Wiernictwo, Nafta, Gaz”*, 2005, nr 22/11.
8. S. Stryczek, *Stan aktualny i przyszłość metod geoinżynierskich*, *Zeszyty Naukowe AGH „Wiernictwo, Nafta, Gaz”*, 2005, nr 22/1.
9. S. Stryczek, K. Jurczyszak-Pawlica, *Budowanie na pewnym gruncie. Kryteria doboru metod i technologii związanych ze wzmacnianiem i uszczelnianiem ośrodka gruntowego i masywu skalnego*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie”, 2006, nr 3.
10. S. Stryczek, *Metody geoinżynierskie modyfikujące właściwości fizyczno-mechaniczne ośrodka gruntowego oraz masywu skalnego*, „Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe”, 1999, nr 4.
11. S. Stryczek, A. Gonet, *Geoinżynieria. Studia, Rozprawy, Monografia nr 71*, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2000.
12. A. Tajduś, *Geoinżynieria – nowe wyzwanie*, *Zeszyty Naukowe AGH „Górnictwo i Geoinżynieria”*, 2003, nr 3–4.



TABELA 1.

## WPLYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA PROMIEŃ INIEKCJI

## Dane do obliczeń:

 $\rho_{zc} = 1800 \text{ kg/m}^3$ ;  $\eta_{pz} = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $T = 1800 \text{ s}$ ;  $r = 0,0365 \text{ m}$ ;  $x = 2 \text{ m}$ ;  $v_w = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 

| Cisnienie iniekcji<br>MPa/<br>mH <sub>2</sub> O<br>Wsp.filtr.<br>[m/s]<br>ulamek porow[-] |                                       | Promień iniekcji R [m]<br>dla           |           |           |           |          |                                     |           |           |           |          |
|---|---------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|   |                                       | przewodu iniekcyjnego z otwartym końcem |           |           |           |          | przewodu iniekcyjnego perforowanego |           |           |           |          |
|   |                                       | 0,2<br>20                               | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 | 0,2<br>20                           | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 |
| Rumosze, żwiry gruboziarn.  | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,5$              | 5,216                                   | 6,572     | 7,523     | 8,28      | 8,919    | 25,444                              | 35,984    | 44,071    | 50,889    | 56,895   |
|   | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,3$              | 6,184                                   | 7,792     | 8,919     | 9,817     | 10,575   | 32,849                              | 46,455    | 56,895    | 65,697    | 73,452   |
| Żwiry drobnoziarn.  | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,4$  | 2,608                                   | 3,286     | 3,761     | 4,14      | 4,46     | 8,996                               | 12,722    | 15,581    | 17,992    | 20,116   |
|   | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,25$ | 3,05                                    | 3,843     | 4,399     | 4,842     | 5,216    | 11,379                              | 16,092    | 19,709    | 22,758    | 25,444   |
| Piaski gruboziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-2}$<br>$n = 0,4$                                |                                       | 1,211                                   | 1,525     | 1,746     | 1,922     | 2,07     | 2,845                               | 4,023     | 4,927     | 5,69      | 6,361    |
| Piaski różnoziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-3}$<br>$n = 0,35$                               |                                       | 0,587                                   | 0,74      | 0,847     | 0,933     | 1,005    | 0,962                               | 1,36      | 1,666     | 1,923     | 2,15     |

TABELA 2

## WPLYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA PROMIEŃ INIEKCJI

## Dane do obliczeń:

 $\rho_{zc} = 1700 \text{ kg/m}^3$ ;  $\eta_{pz} = 0,04 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $T = 1800 \text{ s}$ ;  $r = 0,0365 \text{ m}$ ;  $x = 2 \text{ m}$ ;  $v_w = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 

| Cisnienie iniekcji<br>MPa/<br>mH <sub>2</sub> O<br>Wsp.filtr.<br>[m/s]<br>ulamek porow[-] |                                       | Promień iniekcji R [m]<br>dla           |           |           |           |          |                                     |           |           |           |          |
|---|---------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|   |                                       | przewodu iniekcyjnego z otwartym końcem |           |           |           |          | przewodu iniekcyjnego perforowanego |           |           |           |          |
|   |                                       | 0,2<br>20                               | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 | 0,2<br>20                           | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 |
| Rumosze, żwiry gruboziarn.  | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,5$              | 6,946                                   | 8,751     | 10,017    | 11,026    | 11,877   | 39,098                              | 55,292    | 67,719    | 78,195    | 87,425   |
|   | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,3$              | 8,235                                   | 10,375    | 11,877    | 13,072    | 14,082   | 50,475                              | 71,382    | 87,425    | 100,95    | 112,865  |
| Żwiry drobnoziarn.  | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,4$  | 3,473                                   | 4,375     | 5,009     | 5,513     | 5,938    | 13,823                              | 19,549    | 23,942    | 27,646    | 30,909   |
|   | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,25$ | 4,062                                   | 5,118     | 5,858     | 6,448     | 6,946    | 17,485                              | 24,728    | 30,285    | 34,97     | 39,098   |
| Piaski gruboziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-2}$<br>$n = 0,4$                                |                                       | 1,612                                   | 2,031     | 2,325     | 2,559     | 2,756    | 4,371                               | 4,371     | 7,571     | 8,743     | 9,774    |
| Piaski różnoziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-3}$<br>$n = 0,35$                               |                                       | 0,782                                   | 0,986     | 1,128     | 1,242     | 1,338    | 1,478                               | 2,09      | 2,56      | 2,956     | 3,304    |

TABELA 3

## WPLYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA PROMIEŃ INIEKCJI

## Dane do obliczeń:

 $\rho_{zc} = 1600 \text{ kg/m}^3$ ;  $\eta_{pz} = 0,015 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $T = 1800 \text{ s}$ ;  $r = 0,0365 \text{ m}$ ;  $x = 2 \text{ m}$ ;  $v_w = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 

| Cisnienie iniekcji<br>MPa/<br>mH <sub>2</sub> O<br>Wsp.filtr.<br>[m/s]<br>ulamek porow[-] |                                       | Promień iniekcji R [m]<br>dla           |           |           |           |          |                                     |           |           |           |          |
|---|---------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|   |                                       | przewodu iniekcyjnego z otwartym końcem |           |           |           |          | przewodu iniekcyjnego perforowanego |           |           |           |          |
|   |                                       | 0,2<br>20                               | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 | 0,2<br>20                           | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 |
| Rumosze, żwiry gruboziarn.  | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,5$              | 9,439                                   | 11,892    | 13,613    | 14,983    | 16,14    | 61,94                               | 87,596    | 107,283   | 123,88    | 138,502  |
|   | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,3$              | 11,191                                  | 14,1      | 16,14     | 17,765    | 19,137   | 79,964                              | 113,086   | 138,502   | 159,928   | 178,805  |
| Żwiry drobnoziarn.  | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,4$  | 4,719                                   | 5,946     | 6,807     | 7,492     | 8,07     | 21,899                              | 30,97     | 37,93     | 43,798    | 48,968   |
|   | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,25$ | 5,52                                    | 6,955     | 7,961     | 8,762     | 9,439    | 27,7                                | 39,174    | 47,978    | 55,401    | 61,94    |
| Piaski gruboziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-2}$<br>$n = 0,4$                                |                                       | 2,191                                   | 2,76      | 3,159     | 3,477     | 3,746    | 6,925                               | 9,794     | 11,995    | 13,85     | 15,485   |
| Piaski różnoziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-3}$<br>$n = 0,35$                               |                                       | 1,063                                   | 1,339     | 1,533     | 1,688     | 1,818    | 2,341                               | 3,311     | 4,055     | 4,682     | 5,235    |

TABELA 4

## WPLYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA PROMIEŃ INIEKCJI

## Dane do obliczeń:

 $\rho_{zc} = 1500 \text{ kg/m}^3$ ;  $\eta_{pz} = 0,009 \text{ Pas}$ ;  $T = 1800 \text{ s}$ ;  $r = 0,0365 \text{ m}$ ;  $x = 2 \text{ m}$ ;  $v_w = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 

| Cisnienie iniekcji<br>MPa/mH <sub>2</sub> O<br>Wsp.filtr.<br>[m/s]<br>ulamek porow[-] |                                       | Promień iniekcji R [m]<br>dla           |           |           |           |          |                                     |           |           |           |          |
|---|---------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|   |                                       | przewodu iniekcyjnego z otwartym końcem |           |           |           |          | przewodu iniekcyjnego perforowanego |           |           |           |          |
|   |                                       | 0,2<br>20                               | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 | 0,2<br>20                           | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 |
| Rumosze, żwiry gruboziarn.  | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,5$              | 10,953                                  | 13,8      | 15,797    | 17,387    | 18,729   | 77,425                              | 109,495   | 134,104   | 154,85    | 173,127  |
|   | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,3$              | 12,986                                  | 16,362    | 18,729    | 20,614    | 22,206   | 99,955                              | 141,358   | 173,127   | 199,91    | 223,507  |
| Żwiry drobnoziarn.  | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,4$  | 5,476                                   | 6,9       | 7,898     | 8,693     | 9,365    | 27,374                              | 38,712    | 47,413    | 54,748    | 61,21    |
|   | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,25$ | 6,405                                   | 8,07      | 9,238     | 10,168    | 10,953   | 34,625                              | 48,968    | 59,973    | 69,251    | 77,425   |
| Piaski gruboziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-2}$<br>$n = 0,4$                            |                                       | 2,542                                   | 3,203     | 3,666     | 4,035     | 4,347    | 8,656                               | 12,242    | 14,993    | 17,313    | 19,356   |
| Piaski różnoziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-3}$<br>$n = 0,35$                           |                                       | 1,234                                   | 1,554     | 1,779     | 1,958     | 2,109    | 2,926                               | 4,139     | 5,069     | 5,853     | 6,544    |

TABELA 5

## WPLYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA PROMIEŃ INIEKCJI

## Dane do obliczeń:

 $\rho_{zc} = 1400 \text{ kg/m}^3$ ;  $\eta_{pz} = 0,005 \text{ Pas}$ ;  $T = 1800 \text{ s}$ ;  $r = 0,0365 \text{ m}$ ;  $x = 2 \text{ m}$ ;  $v_w = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 

| Cisnienie iniekcji<br>MPa/mH <sub>2</sub> O<br>Wsp.filtr.<br>[m/s]<br>ulamek porow[-] |                                       | Promień iniekcji R [m]<br>dla           |           |           |           |          |                                     |           |           |           |          |
|---|---------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|   |                                       | przewodu iniekcyjnego z otwartym końcem |           |           |           |          | przewodu iniekcyjnego perforowanego |           |           |           |          |
|   |                                       | 0,2<br>20                               | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 | 0,2<br>20                           | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 |
| Rumosze, żwiry gruboziarn.  | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,5$              | 13,021                                  | 16,405    | 18,779    | 20,669    | 22,265   | 100,354                             | 141,922   | 173,819   | 200,708   | 224,399  |
|   | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,3$              | 15,438                                  | 19,45     | 22,265    | 24,506    | 26,398   | 129,557                             | 183,221   | 224,399   | 259,113   | 289,698  |
| Żwiry drobnoziarn.  | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,4$  | 6,51                                    | 8,203     | 9,39      | 10,335    | 11,133   | 35,481                              | 50,177    | 61,454    | 70,961    | 79,337   |
|   | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,25$ | 7,615                                   | 9,594     | 10,982    | 12,087    | 13,021   | 44,88                               | 63,47     | 77,734    | 89,76     | 100,354  |
| Piaski gruboziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-2}$<br>$n = 0,4$                            |                                       | 3,022                                   | 3,807     | 4,358     | 4,797     | 5,167    | 11,22                               | 15,867    | 19,434    | 22,44     | 25,089   |
| Piaski różnoziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-3}$<br>$n = 0,35$                           |                                       | 1,466                                   | 1,848     | 2,115     | 2,328     | 2,508    | 3,793                               | 5,364     | 6,57      | 7,586     | 8,481    |

TABELA 6

## WPLYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA PROMIEŃ INIEKCJI

## Dane do obliczeń:

 $\rho_{zc} = 1300 \text{ kg/m}^3$ ;  $\eta_{pz} = 0,003 \text{ Pas}$ ;  $T = 1800 \text{ s}$ ;  $r = 0,0365 \text{ m}$ ;  $x = 2 \text{ m}$ ;  $v_w = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 

| Cisnienie iniekcji<br>MPa/mH <sub>2</sub> O<br>Wsp.filtr.<br>[m/s]<br>ulamek porow[-] |                                       | Promień iniekcji R [m]<br>dla           |           |           |           |          |                                     |           |           |           |          |
|---|---------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|   |                                       | przewodu iniekcyjnego z otwartym końcem |           |           |           |          | przewodu iniekcyjnego perforowanego |           |           |           |          |
|   |                                       | 0,2<br>20                               | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 | 0,2<br>20                           | 0,4<br>40 | 0,6<br>60 | 0,8<br>80 | 1<br>100 |
| Rumosze, żwiry gruboziarn.  | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,5$              | 15,061                                  | 18,976    | 21,722    | 23,908    | 25,754   | 124,844                             | 176,556   | 216,236   | 249,688   | 279,16   |
|   | $k_f = 1,0$<br>$n = 0,3$              | 17,857                                  | 22,498    | 25,754    | 28,346    | 30,535   | 161,173                             | 227,933   | 279,16    | 322,346   | 360,393  |
| Żwiry drobnoziarn.  | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,4$  | 7,531                                   | 9,488     | 10,861    | 11,954    | 12,877   | 44,139                              | 62,422    | 76,451    | 88,278    | 98,698   |
|   | $k_f = 1 \cdot 10^{-1}$<br>$n = 0,25$ | 8,808                                   | 11,097    | 12,703    | 13,981    | 15,061   | 55,832                              | 78,958    | 96,704    | 111,664   | 124,844  |
| Piaski gruboziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-2}$<br>$n = 0,4$                            |                                       | 3,495                                   | 4,404     | 5,041     | 5,549     | 5,977    | 13,958                              | 19,74     | 24,176    | 27,916    | 31,211   |
| Piaski różnoziarn.<br>$k_f = 1 \cdot 10^{-3}$<br>$n = 0,35$                           |                                       | 1,696                                   | 2,137     | 2,446     | 2,693     | 2,901    | 4,719                               | 6,673     | 8,173     | 9,437     | 10,551   |

\* prof. dr hab. inż., Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu \*\* mgr inż., doktorantka Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH  
Praca została zrealizowana w ramach badań własnych o nr 10.10.190.317 na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu, AGH