

*Budownictwo i Architektura 4 (2009) 51-62*

## **Weryfikacja doświadczalna nowego równania przepływu dyspersji cementowej**

**Jerzy Szerafin**

*Politechnika Lubelska e-mail: J.Szerafin@pollub.pl*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono nowe rozwiązanie zagadnienia przepływu cementowych mieszanek iniekcyjnych, ujmujące ich dyspersyjny charakter oraz zwięźle opisano sposób uzyskania równań i występujące w nich parametry. Zaprezentowano wyniki analizy obliczeniowej, potwierdzające ogólną poprawność uzyskanych równań. W zasadniczej części artykułu zrelacjonowano przebieg badań doświadczalnych, mających na celu weryfikację przewidywań teoretycznych na podstawie nowego równania przepływu. Badania prowadzono dwuetapowo: pierwszy etap dotyczył określenia parametrów przepływu w prostoliniowych przewodach tłocznych, co odpowiadało ściśle przyjętemu modelowi teoretycznemu. W drugim etapie testowano poprawność wyników obliczeń w bardziej złożonym układzie nieciągłości stosu kruszywowego, charakterystycznego dla wielu przypadków praktycznych aplikacji przepływów iniekcyjnych. Wyniki badań doświadczalnych i obliczeniowych wykazują dobrą zgodność świadczącą o poprawności nowych równań przepływu.

**Słowa kluczowe:** iniekcja, dyspersja cementowa, równania przepływu.

### **1. Wprowadzenie**

Znaczącą część ogółu budowlanych konstrukcji inżynierskich stanowią obiekty wykonane z betonu, bądź też wykonywane technikami murarskimi z rozmaitych materiałów. Są to często budowle eksploatowane od wielu dziesiątków lat, w których materiał konstrukcyjny podlegał naturalnym procesom degradacji wskutek corocznych zmian temperatury, działania wody, niewłaściwej eksploatacji i innych oddziaływań zewnętrznych. Niekorzystny łączny efekt tych oddziaływań jest dodatkowo wzmocniany przez agresywne chemicznie środowisko. Wszystko to sprawia, że struktura materiału pracującego w konstrukcji zawiera różnorodne defekty z licznymi: rysami, kawernami, pustkami. W elementach żelbetowych własności ochronne betonu dla stali zbrojeniowej są obniżone, w związku z tym zmniejsza się też trwałość obiektu.

W wielu przypadkach celowe jest dokonanie naprawy takiego elementu, bądź całej konstrukcji, zarówno ze względów ekonomicznych (poprawa trwałości) jak i kulturowych, gdyż obecnie wiele obiektów wykonanych ze wspomnianych materiałów uznanych jest za zabytkowe i objętych ochroną konserwatorską.

Jedną z metod napraw jest metoda iniekcji ciśnieniowej, polegająca na przywróceniu ciągłości struktury betonu przez wypełnienie powstałych pustek wewnątrznych materiałem iniekcyjnym. Osiągnięta w ten sposób regeneracja lub wzmocnienie

struktury cechuje się wysokim stopniem dyskrecji, bez modyfikacji układu i zmian charakteru wystroju zewnętrznego. Jest to istotne zwłaszcza w przypadku budowli zabytkowych. Metoda iniekcyjnego wypełniania rys jest szczególnie przydatna w naprawach przeciekających konstrukcji podziemnych, w których dostęp od zewnątrz jest utrudniony, zaś próby izolowania od wewnątrz bywają całkowicie nieskuteczne.

Za pierwszą udaną próbę takiej rekonstrukcji uznaje się iniekcję przeprowadzoną na zaporze w Dieppe przez Charles'a Berigry'ego (1772 - 1842). Natomiast w Polsce, po raz pierwszy iniekcję ciśnieniową zastosowano w latach 1930-31 podczas prac wzmacniających prowadzonych w Kolegiacie NMP w Tumie pod Łęczycą. W latach powojennych wykonano wiele udanych wzmocnień i rekonstrukcji, między innymi na zamku w Pieskowej Skale, gmachu Collegium Iuridicum w Krakowie i innych obiektach zabytkowych i niezabytkowych.

Jako materiał iniekcyjny początkowo stosowana była zaprawa i zaczyn cementowy. Dziś znanych jest wiele rodzajów takich materiałów: mineralnych, żywiczych i kompozytów mineralno-żywiczych. W sformułowanych w (Król i Halicka [3]) wymaganiach dotyczących materiałów naprawczych, jako podstawowe wymienia się kompatybilność cech materiału naprawczego i naprawianego, ich dostateczną przyczepność oraz odpowiednie zdolności penetracyjne mieszanki iniekcyjnej. Kryterium kompatybilności cech odnosi się do całego szeregu właściwości fizycznych, jak: wytrzymałość (na ściskanie, rozciąganie), odkształcalność mechaniczna i termiczna, wodoodporność, mrozoodporność, odporność na wysoką temperaturę, trwałość. Można więc wyrazić opinię, że najlepszym materiałem do napraw konstrukcji z betonu jest materiał o cechach fizykochemicznych maksymalnie do niego zbliżonych. To kryterium spełniają najściślej dyspersje na bazie cementu (Ivanyi, Rosa [2]).

Pomimo długoletniej praktyki iniekcji przy zastosowaniu materiałów mineralnych, wciąż brak jest spójnego opracowania teoretycznego, umożliwiającego racjonalny opis tego procesu i stanowiącego pomoc w doborze odpowiednich materiałów i sprzętu w konkretnych warunkach roboczych.

W artykule opisano stosunkowo proste (nadające się do zastosowania w praktycznych aplikacjach) rozwiązanie teoretyczne zagadnienia przepływu materiału iniekcyjnego, oraz przedstawiono badania doświadczalne mające na celu weryfikację poprawności uzyskanych równań.

## **2. Opis rozwiązania teoretycznego przepływu iniekcyjnego**

Opracowanie modelu przepływu iniektu, pozwalającego na optymalizację procesu iniekcji wymaga matematycznego ujęcia problemów cząstkowych:

- modelu geometrycznego nieciągłości struktury iniektowanego tworzywa,
- modelu reologicznego dyspersji iniekcyjnej,
- modelu procesu przepływu.

Zagadnienia związane z reologią zaczynów cementowych posiadają już bogatą dokumentację literaturową. Znanych jest szereg modeli reologicznych, od stosunkowo prostego modelu ciała Binghama, po bardziej skomplikowane, ujmuje nieliniowość przebiegu płynięcia zaczynu cementowego (modele Herschela-Bulkely'ego,

Schofielda-Scott Blaira, nieliniowy i półliniowy Mierzwy (Mierzwa [5] i inne), jak również zawierające elementy uwzględniające dyspersyjny charakter płynu (Bleszczyk [1]).

Natomiast zastosowanie wymienionych modeli w warunkach przepływu, z uwzględnieniem charakterystyki geometrycznej struktury, wewnątrz której odbywa się przepływ, napotyka na szereg trudności matematycznych. Znane w literaturze rozwiązania analityczne w zdecydowanej większości pomijają dyspersyjny charakter mieszanki cementowej, co zdaniem autora prowadzi do powstawania znacznych rozbieżności wyników obliczeń z rzeczywistymi efektami procesu iniekcji. Wobec złożoności zagadnienia, większość proponowanych rozwiązań bazuje na komputerowych metodach obliczeniowych opartych na metodzie elementów skończonych (Malkin [4], Warner [11]).

Rozwiązanie teoretyczne przepływu cieczy dyspersyjnej, poddane analizie w niniejszym artykule, zostało szczegółowo przedstawione w pracy (Szerafin [8]), a sposób jego uzyskania streszczono w (Szerafin [9]). Poniżej przedstawia się podstawowe założenia oraz szczegóły mające znaczenie w dalszej części artykułu.

## 2.1. Założenia

1. Mieszanekę iniekcyjną traktuje się ciecz reostabilną, a więc gradient prędkości w przekroju kanału tłoczego jest wyłącznie funkcją naprężeń stycznych:

$$\frac{dv}{dr} = f(\tau) \quad (1)$$

2. Płynięcie mieszanki iniekcyjnej opisuje model ciała Bingham, uzupełniony o opory natury tarciowej. Dla ciał Bingham równania konstytutywne przyjmują następującą postać:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \frac{dv}{dr}, \quad \text{gdy} \quad \tau > \tau_0, \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dr} = 0, \quad \text{gdy} \quad \tau \leq \tau_0 \quad (3)$$

Powyższe równania nie zawierają składnika odkształceń sprężystych, które jako znikomo małe są pomijane. Uwzględniając opory natury tarciowej w układzie dyspersyjnym, zaproponowane przez (Szwabowski [10]) powyższe równania konstytutywne zapisze się w postaci:

$$\tau = \tau_0 + \sigma \cdot m \cdot \operatorname{tg} \phi + \eta_{pl} \frac{dv}{dr}, \quad \text{gdy} \quad \tau > \tau_0, \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dr} = 0, \quad \text{gdy} \quad \tau \leq \tau_0 \quad (5)$$

W równaniu (4) występują dodatkowe parametry reologiczne związane z dyspersyjny charakterem płynu: „ $m$ ” oznacza stosunek pola powierzchni styku ziaren do całej powierzchni ścięcia,  $\operatorname{tg} \phi$  - kąt tarcia wewnętrznego.

3. Przepływ odbywa się ruchem laminarnym.

4. Ze względu na niewielkie odległości pomiędzy pakierami iniekcyjnymi, będącymi punktami wpływania mieszanki iniekcyjnej, w konstruowaniu równań jej przepływu, przyjmuje się jednokierunkowy model przepływu cieczy, z pominięciem bocznych rozplwów. Obszar nieciągłości struktury betonu, znajdujący się w pobliżu pakierów, na którym następuje formowanie czoła strumienia przepływającej mieszanki iniekcyjnej traktuje się jako przejściowy i nie uwzględnia w równaniach.

5. Przyjmuje się, że na wewnętrznej powierzchni kanalików tłocznych siły adsorpcji są na tyle duże, że nie występuje zjawisko poślizgu, a więc prędkość przepływu wynosi zero.

## 2.2. Równania przepływu

Podstawowe równanie przepływu cieczy dyspersyjnej w kanale o przekroju kołowym, uzyskane na drodze czysto teoretycznej ma postać:

$$p = \frac{6\eta_{pl} \cdot v_{sr} + \tau_0 \cdot D}{D \cdot k} \cdot \left( e^{-\frac{16k \cdot l}{3D}} - 1 \right) + P_0 \cdot e^{-\frac{16k \cdot l}{3D}}. \quad (6)$$

Odnosi się ono do ruchu ustalonego mieszanki iniekcyjnej i wiąże parametry technologiczne instalacji ciśnieniowej (ciśnienie początkowe  $P_0$ , średnia prędkość przepływu w kanale tłocznym  $v_{sr}$ ), parametry geometryczne (średnica kanału tłoczego  $D$ ) oraz parametry reologiczne (granica płynności  $\tau_0$ , lepkość plastyczna  $\eta_{pl}$ , parametr określający opory tarciove „ $k$ ”). Pozwala ono na wyznaczenie wartości ciśnienia tłoczego „ $p$ ”, panującego w dowolnym punkcie kanału tłoczego „ $l$ ”, określonym przez jego odległość od punktu początkowego.

Po uwzględnieniu warunków brzegowych, bezpośrednio z równania (6) wynika zależność pozwalająca wyznaczyć zasięg iniekcji w kanale tłocznym  $L$ :

$$L = \frac{3D}{16k} \cdot \ln \left( \frac{P_0 \cdot k}{\tau_0} + 1 \right). \quad (7)$$

Zasięg iniekcji  $L$  jest wielkością, która pozwala na intuicyjną ocenę wiarygodności rezultatów obliczeń, a którą także stosunkowo łatwo można zmierzyć w trakcie badań doświadczalnych. Dlatego testowanie uzyskanego rozwiązania (6) oparto na analizie równania (7).

## 3. Weryfikacja teoretyczna równania przepływu

W celu dokonania weryfikacji ogólnej poprawności równania przepływu, oszacowano parametry reologiczne, geometryczne i technologiczne, występujące w wyprowadzonych równaniach. Do obliczeń przyjęto jako stałe następujące wielkości:

$$\eta_{pl} = 0,15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\tau_0 = 13,0 \text{ Pa}$$

$$\text{tg}\varphi = 0,03;$$

$$D = 2,0 \text{ mm}$$

$$P_0 = 0,6 \text{ MPa.}$$

$$m = 0,043;$$

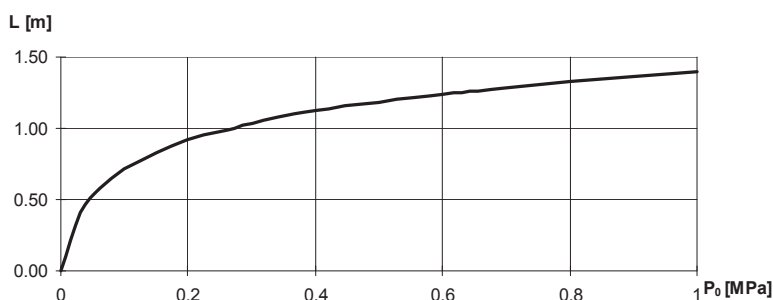
$$\lambda = 0,94$$

$$\Rightarrow$$

$$k = \text{tg}\varphi \cdot m \cdot \lambda = 0,0012$$

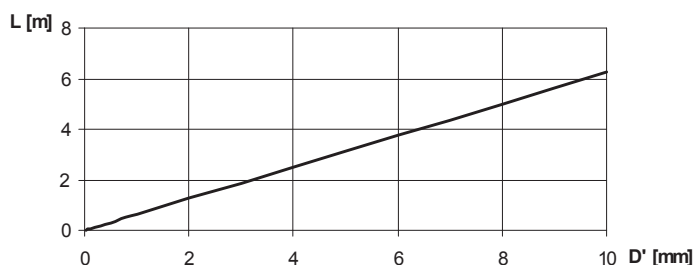
Przyjęte parametry reologiczne odpowiadają dyspersji cementowej bez domieszek i dodatków, o wskaźniku  $w/c=0,5$  i wielkości powierzchni właściwej cementu  $F_B = 5000\text{cm}^2/\text{g}$ . Następnie zmieniając w określonym zakresie wartości poszczególnych parametrów ustalono charakter ich wpływu na zasięg tłoczenia  $L$ .

Ciśnienie tłoczne na wyjściu pompy iniekcyjnej  $P_0$  nie może być dowolnie duże, gdyż jak wynika z praktyki, zbyt duże ciśnienie powoduje odpływ wody i powstanie zatorów. Przyjęta w rzeczywistych realizacjach procesu iniekcji maksymalna wielkość ciśnienia  $P_0$  wynosi około 0,4 do 1,0 MPa. W obliczeniach wpływu ciśnienia uzyskiwanego na wejściu kanału tłocznego na zasięg  $L$  przyjęto zakres zmienności  $P_0$  od 0 do 1,0 MPa.



Rys. 1. Wpływ ciśnienia tłoczego  $P_0$  na zasięg tłoczenia  $L$  na podstawie równania (7).  
Fig. 1. Influence of the injection pressure  $P_0$  on the injection range  $L$ .

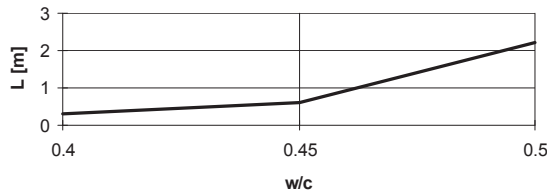
Jak wynika z konstrukcji równania (7), zmiany średnicy kanału tłocznego wpływają liniowo na zasięg tłoczenia  $L$ . Jest to zgodne z przewidywaniami dla średnic przewodu tłocznego większych o rząd wielkości od maksymalnych średnic ziaren cementu. Przy mniejszych średnicach  $D$  obserwuje się w praktycznych realizacjach procesu iniekcji wpływ dyspersyjnego charakteru cementowej mieszanki iniekcyjnej i blokowanie przepływu niezależnie od wielkości ciśnienia tłoczego, wskutek zakleszczania się cząstek stałych. Krytyczne średnice przewodu tłocznego zależą od rodzaju cementu i wahają się w granicach od 0,1mm do 1mm. Tego efektu równanie (7) nie odzwierciedla, dla uzyskania w pełni poprawnego opisu należy dodać dodatkowe warunki ograniczające zakres ważności równania (7) ze względu na średnicę przewodu tłocznego.



Rys. 2. Wpływ średnicy kanału tłocznego  $D$  na zasięg  $L$  według wzoru (7).  
Fig. 2. Influence of the channel diameter  $D$  on the injection range  $L$ .

Parametry reologiczne:  $\tau_0$ ,  $\lambda$ ,  $m$ ,  $\text{tg}\varphi$  nie są zmiennymi niezależnymi, ale zmiany ich wartości występują łącznie. Dlatego też wpływ stopnia upłynnienia dyspersji

przedstawiony na Rys. 3 ujęto obliczając występujące w równaniu (7) wartości parametrów reologicznych dla poszczególnych  $w/c$ .



Rys. 3. Wpływ stopnia upłynnienia dyspersji cementowej mierzony wskaźnikiem  $w/c$  na zasięg tłoczenia  $L$ , na podstawie równania (7).

Fig. 3. Influence of the flowability of the cement mix on the injection range  $L$ .

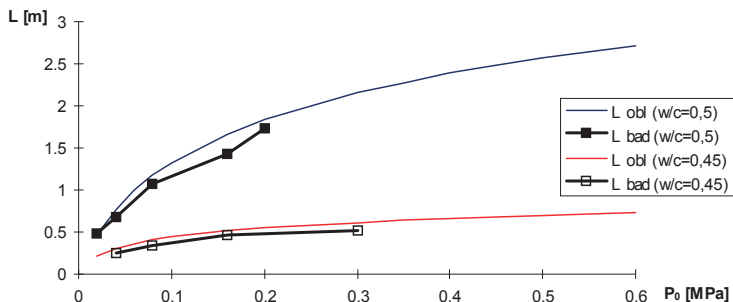
Ogólny charakter wpływu poszczególnych parametrów procesu iniekcji na jej zasięg, zilustrowany na Rys. 1 – 3 jest zgodny z oczekiwaniami i danymi doświadczalnymi. Najważniejsze różnice w stosunku do rozwiązań klasycznych, nie uwzględniających dyspersyjnego charakteru mieszanki cementowej i związanych z tym oporów tarciovych, dotyczą nieliniowej relacji „ciśnienie – zasięg iniekcji” oraz generalnie znacznie mniejszego (o ok. rząd wielkości) spodziewanego zasięgu iniekcji.

## 4. Weryfikacja doświadczalna równania przepływu

### 4.1. Badania zasięgu iniekcji w prostoliniowych przewodach o przekroju kołowym

Weryfikacja uzyskanych równań przepływu dyspersji w kanałach o przekroju kołowym odbywała się w warunkach możliwie dokładnie odpowiadających modelowym, tzn. w prostoliniowych rurkach, o kołowym przekroju i średnicy wewnętrznej  $D = 2,4\text{mm}$ . Parametry reologiczne przetłaczanego zaczynu cementowego bez dodatków o wskaźniku  $w/c = 0,45$  i  $0,5$  wyznaczano bądź doświadczalnie ( $\tau_0$ ,  $\eta_{pl}$ ), bądź obliczeniowo ( $m$ ,  $\text{tg}\varphi$ ,  $\lambda$ ), według metodyki podanej w (Szerafin [8]) i szczegółowo zrelacjonowanej w (Szerafin [9]).

Obliczony na podstawie równania (7) zasięg tłoczenia  $L$  wraz z wynikami badań doświadczalnych przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Rzeczywisty  $L_{bad}$  i obliczeniowy  $L_{obl}$  (na podstawie równania 7) zasięg tłoczenia dyspersji cementowych w przewodach kołowych.

Fig. 4. Injection range in the circular channel: experimental ( $L_{bad}$ ) and calculation ( $L_{obl}$ ) results.

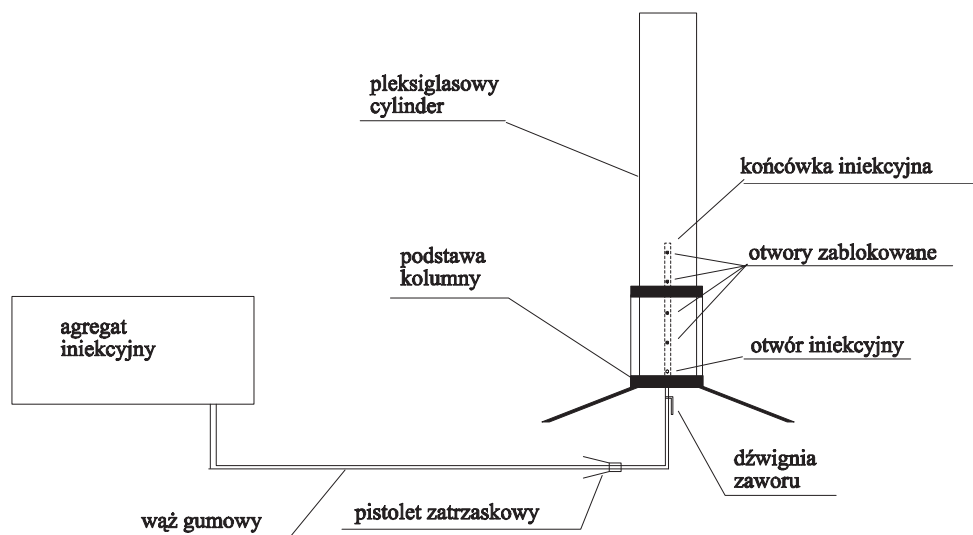
Wyniki badań doświadczalnych dość dobrze pokrywają się z obliczeniowymi, z błędem nie przekraczającym 20 %. Rzeczywisty zasięg tłoczenia był nieco mniejszy, co można tłumaczyć pominięciem w obliczeniach strat ciśnienia powstających na wejściu przewodu.

## 4.2. Badania zasięgu iniekcji w stosach kruszywowych

Wobec dobrej zgodności wyników obliczeniowych zasięgu tłoczenia w warunkach modelowych, świadczącej o ilościowej poprawności wyprowadzonych równań przepływu powstaje pytanie, w jakim stopniu można je wykorzystać do opisu iniekcji w bardziej nieregularnych układach nieciągłości występujących w warunkach praktycznych.

Jednym z typów nieciągłości strukturalnych jest układ pustek charakterystyczny dla stosu kruszywowego, tworzących sieć wzajemnie połączonych jam i kanalików. Iniekcje takich struktur przeprowadza się również w ramach dwuetapowych technologii wykonywania konstrukcji z betonu (Prepakt, Polcrete). Zbliżony rodzaj układu nieciągłości struktury powstaje w elementach z betonu wskutek np. silnej korozji ługującej lub błędów wykonawczych (niewłaściwe zagęszczenie betonu).

Przedstawiane badania dotyczą iniekcyjnego wypełniania pustek wytworzonych pomiędzy ziarnami kruszywa umieszczonego i zagęszczonego w pionowym cylindrze o wysokości 200 cm i średnicy 15 cm. Przezroczyste ścianki cylindra badawczego umożliwiały wizualną obserwację postępów procesu iniekcyjnego. Schemat badawczy przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego do badań iniekcji w stosach kruszywowych.  
Fig. 5. The device for testing flow of the grout in the aggregate's pile.

Kruszywo umieszczane w cylindrze pomiarowym składało się z frakcji od 0,5 do 8,0 mm, lub od 1,0 – 8,0 mm. Dla obu rodzajów uziarnienia stosu kruszywowego, jako miarodajną średnicę zastępczą, przyjęto za (Mikoś [6]) średnicę hydrauliczną obliczaną ze wzoru:

$$d_h = \frac{2\varepsilon \cdot d_s}{3(1-\varepsilon)}, \quad (8)$$

w którym:  $\varepsilon$  – porowatość stosu, określona na podstawie pomiarów objętości i masy stosu,  $d_s$  – średnica zastępcza ziaren stosu, tzw. średnica Sautera  $d_s = 6V_S/A_S$ .

Do przygotowania mieszanki iniekcyjnej stosowano dwa rodzaje cementu, różniące się stopniem przemiału:

- $C_1$  : o powierzchni właściwej mierzonej wg Blaina  $F_{B1} = 3600 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,
- $C_2$  : o powierzchni właściwej mierzonej wg Blaina  $F_{B2} = 4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

W części mieszanek iniekcyjnych stosowano firmową domieszkę upłynniającą, oznaczoną tu symbolem U-1, w ilości 1% wagi cementu. Domieszka ta obniża napięcie powierzchniowe wody i zmniejsza tarcie wewnętrzne pomiędzy ziarnami cementu. Wszystkie mieszanki iniekcyjne wykonywano przy wskaźniku  $w/c = 0,5$ .

W trakcie badań pomiarowi podlegały następujące wielkości:

- ciśnienie tłoczne  $P_0$ ,
- zasięg tłoczenia  $L$  (wysokość słupa iniektu w kolumnie),
- czas trwania procesu iniekcji.

Ponadto obserwowano wizualnie przebieg badania poprzez przezroczyste ścianki cylindra pomiarowego notując wszelkie nieprawidłowości w postaci lokalnego blokowania się przepływu czy wypychania warstw kruszywa pod ciśnieniem tłocznej mieszanki iniekcyjnej.

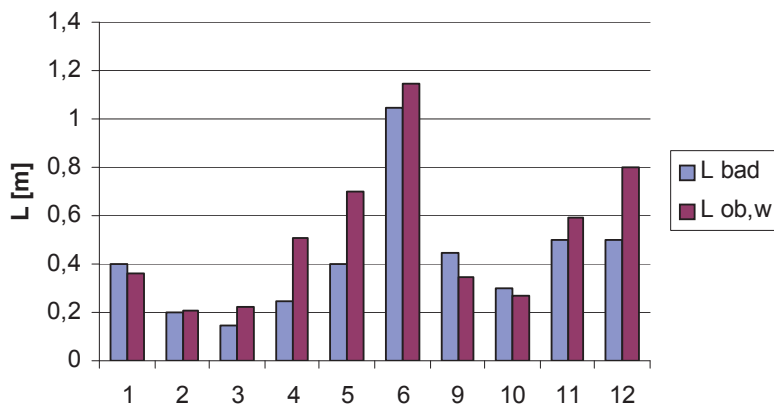
W Tabelicy 1 zestawiono wielkości parametrów geometrycznych i reologicznych, dane doświadczalne odnośnie wielkości ciśnienia tłoczego  $P_0$  i zasięgu tłoczenia  $L_{bad}$ , oraz wyniki obliczeń zasięgu tłoczenia  $L_{obl}$  na podstawie równania (7). Graficzne porównanie wyników badań i obliczeń przedstawiono na Rys. 6.

Tablica 1. Zestawienie danych doświadczalnych i obliczeniowych iniekcji w stosach kruszywowych.

Table 1. Experimental and calculation results of grouting in the aggregate's pile.

nr	Rodzaj cementu	upłynniacz	$d_h$ [mm]	$\tau_0$ [Pa]	$\text{tg}\varphi$	$m$	$\lambda$	$P_0$ [MPa]	$t$ [s]	$L_{bad}$ [m]	$L_{obl}$ [m]
1	$C_1$		0,26	12,1	0,014	0,031	0,972	1,0	25	0,4	0,36
2	$C_2$		0,26	15,0	0,021	0,039	0,958	0,8	60	0,2	0,21
3	$C_2$		0,26	15,0	0,021	0,039	0,958	1,0	40	0,15	0,22
4	$C_2$	1% U-1	0,26	9,4	0,007	0,031	0,987	0,4	30	0,25	0,51
5	$C_2$	1% U-1	0,26	9,4	0,007	0,031	0,987	1,0	20	0,4	0,70
6	$C_1$		0,4	12,1	0,014	0,031	0,972	1,0	30	1,05	1,15
7	$C_1$	1% U-1	0,4	2,3	0,002	0,025	0,995	0,4	50	>1,5	3,09
8	$C_1$	1% U-1	0,4	2,3	0,002	0,025	0,995	0,2	90	>1,5	2,3
9	$C_2$		0,4	15,0	0,021	0,039	0,958	1,0	36	0,45	0,35
10	$C_2$		0,4	15,0	0,021	0,039	0,958	0,4	60	0,3	0,27
11	$C_2$	1% U-1	0,4	9,4	0,007	0,031	0,987	0,2	60	0,5	0,59
12	$C_2$	1% U-1	0,4	9,4	0,007	0,031	0,987	0,4	40	0,5	0,80





Rys. 6. Porównanie wyników obliczeń zasięgu tłoczenia  $L_{obl}$  z wynikami badań  $L_{bad}$  iniekcji w stosach kruszywowych.

Fig. 6. Comparison of the calculation ( $L_{obl}$ ) and experimental ( $L_{bad}$ ) results of grouting in the aggregate's pile.

Równanie (7), na podstawie którego wyliczano zasięg tłoczenia  $L_{obl}$ , dotyczy przepływów dyspersji w prostoliniowych przewodach o przekroju kołowym. Dostosowując je do warunków iniekcji w stosach kruszywowych, makroporowatej strukturze betonu czy też w gruntach, proponuje się wprowadzić współczynnik uwzględniający zmiany kierunku myślowo wyodrębnionego kanalika tłocznego o średnicy  $d_h$ . Wartość tego współczynnika, nazywanego dalej współczynnikiem krętości  $\kappa$ , powinna być mniejsza od jedności ze względu na dodatkowe opory ruchu powstające przy zmianie kierunku przepływu. Wzór na zasięg tłoczenia w opisywanych strukturach przybierze postać:

$$L = \kappa \cdot \frac{3D}{16k} \cdot \ln \left( \frac{P_0 \cdot k}{\tau_0} + 1 \right). \quad (9)$$

Wartość współczynnika  $\kappa$  powinna być inna dla każdego z dwóch objętych badaniami stosów kruszywowych, które różniły się pod względem granulometrycznym. Wychodząc z warunku uzyskania maksymalnej zgodności wyników badań z wynikami obliczeń, wartości współczynnika krętości  $\kappa$  powinny wynieść:

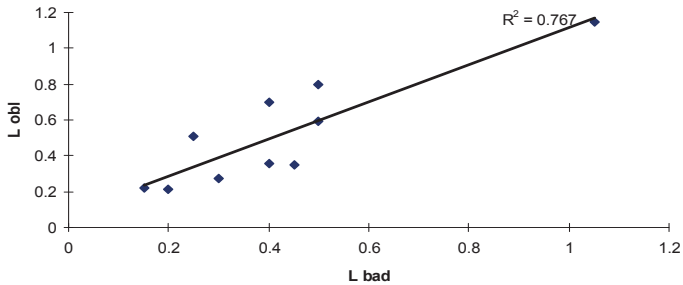
- dla stosu o uziarnieniu od 0,5 do 8,0 mm – 0,76,
- dla stosu o uziarnieniu od 1,0 do 8,0 mm – 0,96.

Mniejsza wartość współczynnika  $\kappa$  dla stosów kruszywowych o drobniejszym uziarnieniu jest uzasadniona częstszą zmianą kierunku wyodrębnionego kanalika tłocznego, a więc i większymi oporami przepływu.

Wprowadzenie współczynnika krętości  $\kappa$  zwiększa stopień korelacji pomiędzy wynikami badań, a wynikami obliczeń. W opisywanych badaniach: z 0,767 do 0,834 (por. Rys. 7 i 8).

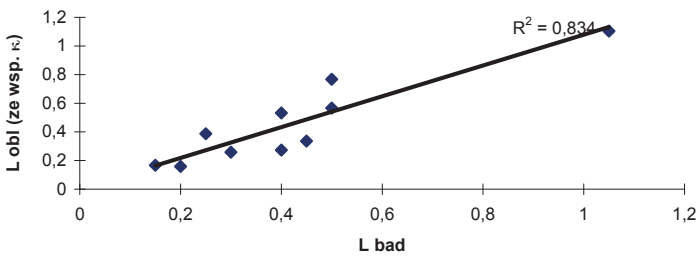
Iniekcje w warunkach rzeczywistych, odbiegających od modelowych, cechują się dużymi rozrzutami rezultatów, co potwierdzają też wyniki opisywanych badań. Dlatego też, zdaniem autora rozrzuty wyników mierzone stosunkiem  $L_{bad}/L_{obl}$  w granicach  $0,7 \div 1,5$  należy uznać za stosunkowo niewielkie. Warunek ten

spełniają próby nr 1, 2, 3, 5, 6, 9, 10, 11 (8 wyników z 10 branych pod uwagę). Pozostałe, nr 4 i 12, wykazują większe odchylenia (wyniki otrzymane w trakcie badań są niższe od obliczeniowych) i co charakterystyczne, dotyczą mieszanek iniekcyjnych z upłynniaczem. Można to uznać za prawidłowość, bowiem domieszka upłynniająca pogarsza stabilność mieszanki iniekcyjnej i przyczynia się do zwiększania tendencji do powstawania zatorów i blokady dalszego przepływu.



Rys. 7. Korelacja pomiędzy wynikami badań a wynikami obliczeń bez uwzględnienia współczynnika krętości  $\kappa$ .

Fig. 7. Correlation between experimental and calculation results without including bendiness coefficient  $\kappa$ .



Rys. 8. Korelacja pomiędzy wynikami badań a wynikami obliczeń z uwzględnieniem współczynnika krętości  $\kappa$ .

Fig. 8. Correlation between experimental and calculation results including bendiness coefficient  $\kappa$ .

## 5. Spostrzeżenia i wnioski

1. Model ciała Bingham nie oddaje w sposób dokładny rzeczywistego zachowania się dyspersji cementowych, w trakcie iniekcyjnego wypełniania pustek w strukturze betonu. W warunkach ciśnień panujących w procesie iniekcji, rzędu  $0,3 \div 0,6$  MPa, dużą rolę odgrywają opory przepływu o charakterze tarciovym. Wielkość tych oporów zależy od wielkości ciśnienia tłocznego, płynności mieszanki iniekcyjnej, wielkości kanału tłocznego. Model dyspersyjnej mieszanki iniekcyjnej, uwzględniający składnik oporów tarcia na stykach ziaren cząstek stałych, pełniej opisuje zjawiska zachodzące w trakcie jej tłoczenia.
2. Wyniki analiz obliczeniowych równania przepływu dyspersji przedstawione na rysunkach 1 - 3 wskazują na ogólną poprawność przyjętego rozwiązania, potwierdzoną ilościowo w trakcie badań doświadczalnych prowadzonych w prostoliniowych przewodach o kołowym przekroju.
3. Rezultaty obliczeń zasięgu tłoczenia, przy przyjętym modelu kanału tłocznego o zastępczej średnicy  $d_h$  i z uwzględnieniem współczynnika krętości  $\kappa$ , wykazują

dobrą zgodność z wynikami badań. Świadczy to o możliwości zastosowania podanych równań przepływu dyspersji cementowych do opisu procesu iniekcji w układzie nieciągłości o charakterze zbliżonym do badanych stosów kruszywowych, w tym silnie zdefektowanych struktur betonowych.

4. Wpływ domieszek iniekcyjnych jest niejednoznaczny. Poprawie ulega iniekcyjność mieszanki, lecz jednocześnie zwiększają się jej skłonności do segregacji.
5. W badanych stosach kruszywowych mniej korzystne efekty osiągnięto, gdy stosowano cement o drobniejszym uziarnieniu. Przyczyn należy upatrywać w mniejszej płynności mieszanek o drobniejszym, a więc bardziej wodożądnym cemencie.

## Literatura

- [1] Bleszczik N. P., *Strukturalno-mechaniceskije swojstwa i reologia bietonnoj smiesi i preswakumbietona*, Nauka i Tiejchnika. Mińsk 1977.
- [2] Ivanyi G., Rosa W., *Füllen von Rissen und Hohlräumen im Konstruktionsbeton mit Zementsuspension*, Beton- und Stahlbetonbau 9/92.
- [3] Król M., Halicka A., *Strategy of restoration of concrete structures with active compatible materials*, Proceedings of International Congress „Concrete in the Service of Mankind” Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. Dundee 1996.
- [4] Malkin A., *Rheology Fundamentals*, ChemTec Publishing, 1994.
- [5] Mierzwa J., *Właściwości reologiczne zaczynów cementowych stosowanych w wybranych procesach technologicznych budownictwa*, Monografia. Politechnika Krakowska 1988.
- [6] Mikoś J., *Związki fizyczne struktury porowatości z cechami betonu cementowego*, Zeszyty Naukowe. politechnika Śląska. Gliwice 1979.
- [7] Struble L. J., Ji X., rozdział *Rheology* w: *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*.
- [8] Szaferafin J., *Równania konstytutywne cieczy w zastosowaniu do dyspersji cementowych w procesie iniekcyjnego wypełniania pustek w strukturze betonu*, Rozprawa doktorska, Lublin 1999.
- [9] Szaferafin J., *Wpływ tarciovych oporów ruchu na zasięg tłoczenia dyspersji cementowej*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2008.
- [10] Szwabowski J., *Urabialność mieszanki betonowej w ujęciu reologicznym*, ZN Politechniki Śląskiej. Gliwice 1987.
- [11] Warner J., *Practical Handbook of Grouting. Soil, Rock and Structures*, Wiley and Sons, New Jersey 2004.

## **Experimental testing of the new flow equation of cement dispersion**

**Jerzy Szerafin**

*Lublin University of Technology, e-mail: j.szerafin@pollub.pl*

**Summary:** The new flow equation of cement dispersion included factor of the friction between cement grains is presented in the paper. The analysis of the calculation's results confirms the property of new equation. In the main part of the paper the results of experimental research were presented. The first part of research applies to cement flow through annular pipe, which exactly matches the theoretical model assumptions. The second part of flow tests was carried out in aggregate pile, which is typical to many practical applications of cement injection. Calculation and experimental test's results are compatible and proof the correctness of new flow equations.

**Key words:** injection, cement dispersion, flow equations.