

## ZASTOSOWANIE TECHNIKI FILMOWEJ DO BADAŃ WZMACNIANIA I USZCZELNIANIA GRUNTÓW

*Maria Elektronowicz, Maciej Skup*

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie  
Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa w Warszawie

### WPROWADZENIE

Wzmacnianie i uszczelnianie podłoża ma coraz większe znaczenie wśród różnych zabiegów inżynierskich. Przy wzrastającej potrzebie budowy nowych obiektów przemysłowych, górniczych, hydrotechnicznych czy aglomeracji miejskich wyłania się konieczność lokalizowania ich, niezależnie od dogodności warunków hydrogeologicznych. Postępujące uprzemysłowienie kraju, rozwój hodowli zwierząt i roślin niesie za sobą wzrost zanieczyszczeń, które — infiltrując w głąb gruntu w postaci pierwotnych lub wtórnych ścieków — obniżają wartość wód podziemnych, zanieczyszczają wody powierzchniowe. Wiele spośród zanieczyszczeń nie ulega rozkładowi, podwyższając toksyczność wód.

Jedną ze skuteczniejszych metod ochrony stref nietoksycznych jest odcięcie ich od źródeł zasilania zanieczyszczeniami. Dokonać tego można, np. konstruując wokół stref skażonych nieprzepuszczalne ekrany. Dla uniknięcia pracochłonnych, angażujących dużą ilość sprzętu, robót ziemnych można zastosować do budowy ekranów metodę iniekcji. Metoda ta jest ekonomiczna, zwłaszcza przy tworzeniu ekranów na dużych głębokościach. W procesie iniekcji za pomocą studni perforowanych, tzw. iniektorów, wprowadza się w wolne przestrzenie ośrodka gruntowego ciekły iniekt, który po pewnym czasie zestala się, tworząc wraz z ziarnami gruntu zwartą strukturę. Obszar poddany działaniu iniekcji zmienia swoje własności fizyko-mechaniczne, dzięki czemu można ją stosować do uszczelniania i wzmacniania podłoża.

### NOWA METODA USZCZELNIANIA GRUNTÓW

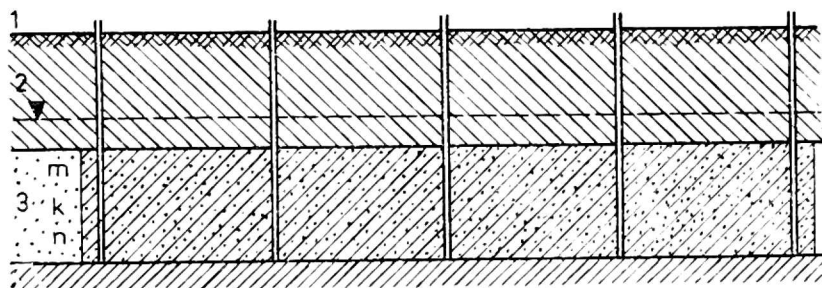
Klasyczny sposób wykonywania ekranów metodą iniekcji odznacza się dużą pracochłonnością robót wiertniczych, wykonywanych dla usytuowa-

nia w gruncie iniektorów, oraz dużym zużyciem materiału iniekcyjnego na skutek niekontrolowanego rozplywu iniektu. Aby przeciwdziałać temu, podjęto próbę opracowania nowej metody, opartej na sterowanej hydraulicznie iniekcji.

Biorąc pod uwagę postęp w dziedzinie chemii organicznej, w rozważaniach uwzględniono iniekty oparte na bazie polimerów. Takie cechy jak współczynnik dynamicznej lepkości i ciężar właściwy zbliżony do wody, praktycznie nie wzrastająca lepkość w początkowej fazie żelowania oraz dowolnie regulowany czas żelowania spowodowały, że zastosowano w badaniach modyfikowaną żywicę mocznikowo-formaldehydową MS-10.

Sterowany przepływ iniektu uzyskuje się, tłocząc iniekt w studnie parzyste, umieszczone wzdłuż osi ekranu, z jednoczesnym odpompowaniem wody z ośrodka przez studnie nieparzyste. Ze względu na technologię iniekcji rozpatrzono w badaniach jeden odcinek, utworzony w wyniku działania jednej studni tłoczącej i dwu ssących (rys. 1). Układ taki

A - przekrój pionowy



B - przekrój poziomy



Rys. 1. Ekran wykonany metodą hydraulicznie sterowanej iniekcji: 1 — poziom terenu, 2 — ciśnienie statyczne, 3 — warstwa wodonośna, 4 — oś ekranu, k — współczynnik filtracji, m — miąższość warstwy wodonośnej, n — porowatość warstwy

przy odpowiednich parametrach może skutecznie ograniczać rozplyw w płaszczyźnie prostopadłej do osi ekranu. Dla określenia parametrów iniekcji sterowanej należało przeprowadzić analizę teoretyczną i empiryczną zjawiska. Należało określić takie parametry, jak szybkość rozprzestrzeniania się iniektu, czas przejścia frontu iniekcji między studnią tłoczącą i ssącą oraz zasięg rozplywu w płaszczyźnie prostopadłej do osi ekranu.

Parametry te dla przypadku, kiedy lepkość iniektu jest równa lepkości wody, zostały określone na drodze teoretycznej, przy założeniu homogenicznej warstwy wodonośnej o napiętym zwierciadle wody podziemnej.

$$t_x |_{a \neq 0,5} = \frac{\pi mn}{Q} \left( -x^4 \frac{1}{2l^2} + x^2 + r_o^4 \frac{1}{2l^2} - r_o^2 \right)$$

$$t_x |_{a \neq 0,5} = \frac{\pi mn}{Q(2a-1)} \left\{ \left( l^2 + \frac{l^2}{1a-1} \right) m \left[ \frac{x^2(2a-1) + l^2}{r_o^2(2a-1) + l^2} \right] - x^2 + r_o^2 \right\}$$

$$t_y |_{a \neq 0,5} = \frac{\pi mn}{Q} \left( y^4 \frac{1}{2l^2} + y^2 - \frac{r_o^4}{2l^2} - r^2 \right)$$

$$t_y |_{a \neq 0,5} = \frac{\pi mn}{Q(2a-1)} \left\{ \left( l^2 + \frac{l^2}{2a-1} \right) m \left[ \frac{r_o^2(2a-1) - l^2}{y^2(2a-1) - l^2} \right] - y^2 + r_o^2 \right\}$$

gdzie

$t_x, t_y$  — czas przepływu iniektu wzdłuż osi  $x$  i  $y$ ,

$l$  — rozstaw studzien,

$r_o$  — promień studni,

$Q$  — natężenie przepływu w studni tłoczącej,

$m$  — miąższość warstwy wodonośnej,

$n$  — porowatość warstwy wodonośnej,

$a$  — stosunek natężenia przepływu w studni ssącej do tłoczącej.

Przy lepkości iniektu różnej od lepkości wody rozwiązanie analityczne zagadnienia nie jest możliwe. W tym przypadku do określenia parametrów iniekcji sterowanej posłużono się techniką filmową.

#### METODYKA BADAŃ

Analiza zarejestrowanego za pomocą kamery filmowej każdego doświadczenia, symulującego rozpliw iniektu w ośrodku gruntowym, pozwoliła na rozwiązanie problemu z wysoką dokładnością. Doświadczenia przeprowadzono na poziomym modelu szczelinowym Hele-Shaw, którego działanie oparte jest na analogii lepkościowej — przepływ cieczy lepkiej w wąskiej szczelinie między dwoma płytkami odpowiada przepływowi cieczy w ośrodku gruntowym. Zastosowanie w modelu szklanej wierzchniej płyty pozwoliło na dokładną obserwację zjawiska w czasie. Otwory w dolnej płycie, podłączone do pomp dozujących, symulowały studnie ssące i tłoczące. Cieczą wypełniającą szczelinę we wszystkich badaniach była gliceryna. Cieczą symulującą iniekt w pierwszej fazie była gliceryna, w drugiej fazie badań różnego typu oleje. Dokładność odczytu położenia konturu cieczy symulacyjnej iniekt w każdej chwili czasowej była istotnym elementem badań, toteż dla zwiększenia kontrastowości jedną z cieczy barwiono.

Stanowisko do badań wykonano w formie prostopadłościanu z typowych kątowników perforowanych. Wewnątrz prostopadłościanu umiesz-

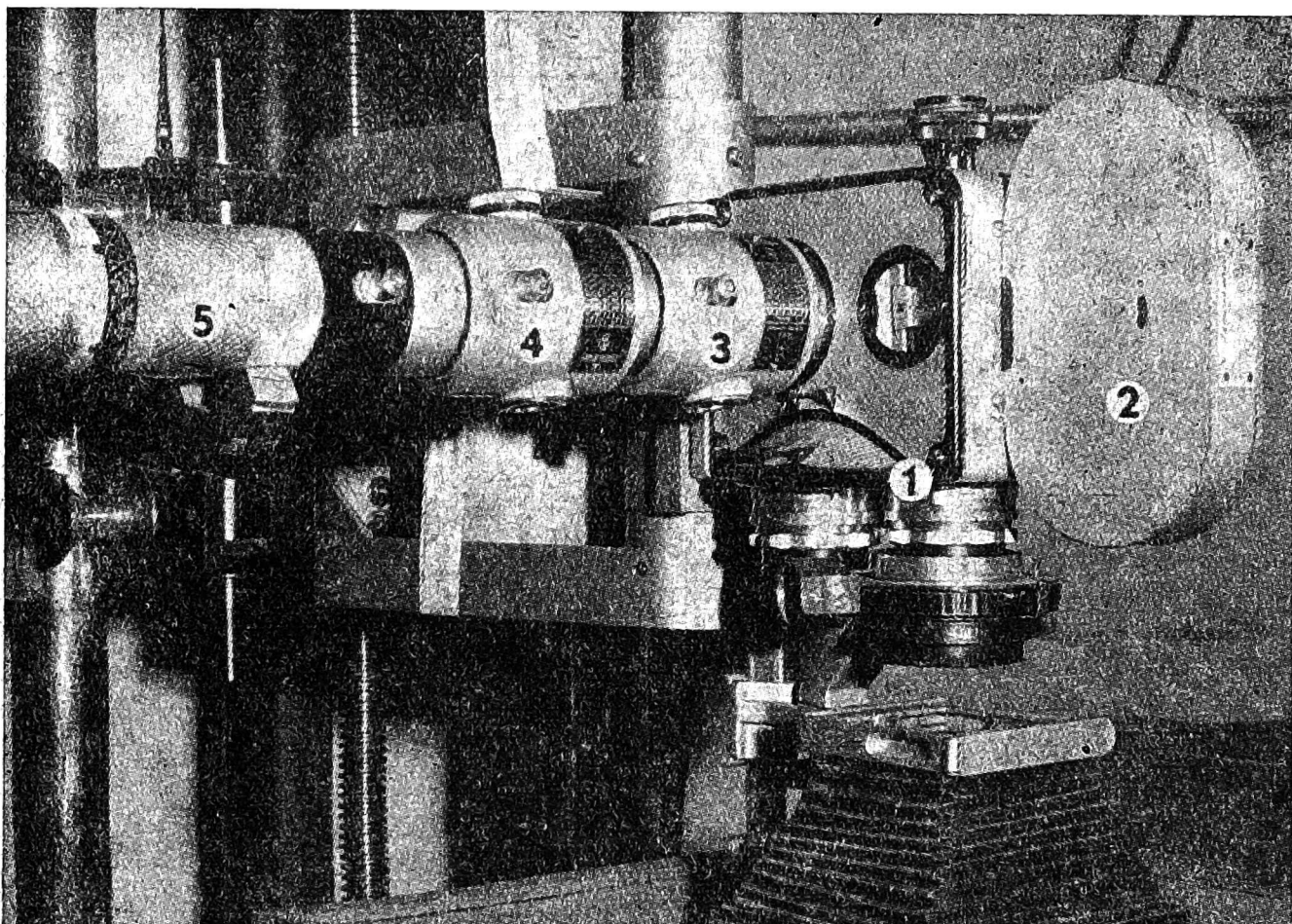
czono model szczelinowy. Górę prostopadłościanu stanowił obszerny pomost dla operatora kamery. Na pomoście zamontowano pryzmatyczne gniazdo, pozwalające na wyjmowanie i zakładanie kamery bez zmiany jej pola widzenia. Jednocześnie dla uniknięcia niepożądanych odbić i odblasków w szklanej płycie modelu osłonięto od wewnątrz konstrukcję prostopadłościanu ciemnymi osłonami, a na kompendium kamery podwieszono sztuczny „sufit” z czarnego kartonu (rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko badawcze z modelem szczelinowym

Do zdjęć zastosowano kamerę filmową Pentaflex 16 mm z dwoma przystawkami redukcyjnymi i normalnym silnikiem 12 V. Ze względu na stosunkowo długi czas trwania zjawiska zastosowano rejestrację eksperymentu z częstotliwością 0,75 i 1 kl/s. Taka częstotliwość była wystarczająca dla otrzymania odpowiedniej ilości punktów badawczych. Połączenie kamery z silnikiem przedstawia rysunek 3. Silnik kamery został ustawiony na 12 kl/s. Natomiast przystawkę 1 ustawiono na stosunek redukcji 1:4, a przystawkę 2 nastawiono zmiennie na 1:4 lub 1:3, co dawało pożądane zwolnienie frekwencji zdjęć do 0,75 lub 1 kl/s. Silnik kamery zasilany był z ogniwa 12 V. Zastosowanie do kamery silnika nowszego typu, zatrzymującego się „na klatkę”, pozwoliło prowadzącemu badania na zdalną obsługę kamery prostym wyłącznikiem elektrycznym.

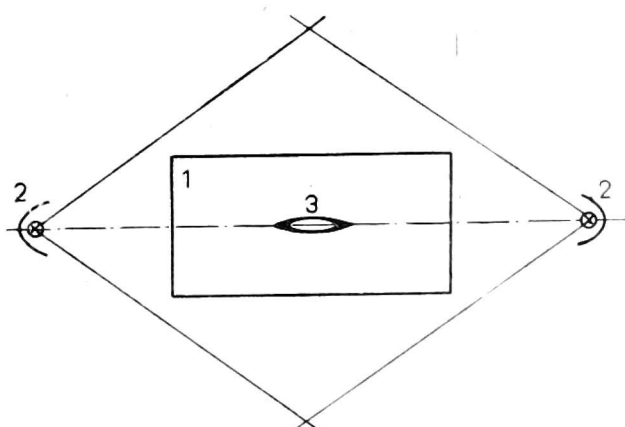
W czasie doświadczeń zastosowano proste oświetlenie powierzchni modelu typu reprodukcyjnego, złożone z dwu lamp parabolicznych, używa-



Rys. 3. Połączenie kamery filmowej z silnikiem: 1 — kamera, 2 — kasetka, 3 i 4 — przystawki redukcyjne obrotów w stosunku 1:1, 2, 3, 4, 5 — silnik 12V normalny zdjęciowy z zatraskiem „na klatkę” i z częstotliwością zdjęć 12, 18, 20, 24, 32 kl/s

nych w fotografii portretowej. Użyto w nich żarówek mleczych powiększalnikowych, o mocy 250 W. Pierwotne użytkowanie lamp względem modelu pokazano na rysunku 4. Regulacji oświetlenia dokonano, posługując się światłomierzem Weston-Master IV, dokonując dla wielu punktów modelu pomiaru światła odbitego na skali słabych światła. Ekspozycję mierzono wyłącznie w systemie pomiaru światła padającego na tej samej skali.

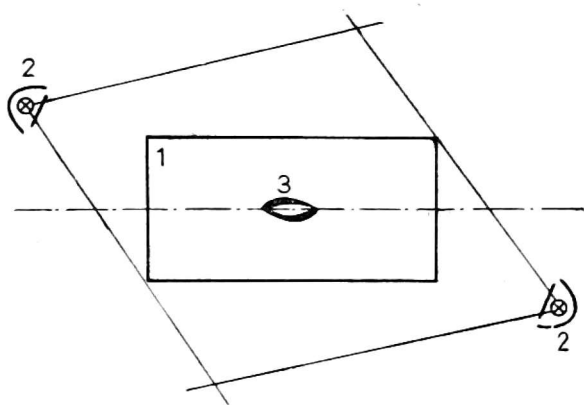
Z uwagi na zmienność parametrów zjawiska w czasie na każdej klatce filmowej należało zarejestrować czas bieżący eksperymentu. W tym celu



Rys. 4. Pierwotne oświetlenie modelu: 1 — płyta modelu, 2 — lampa oświetlająca, model, 3 — kontur badanego zjawiska

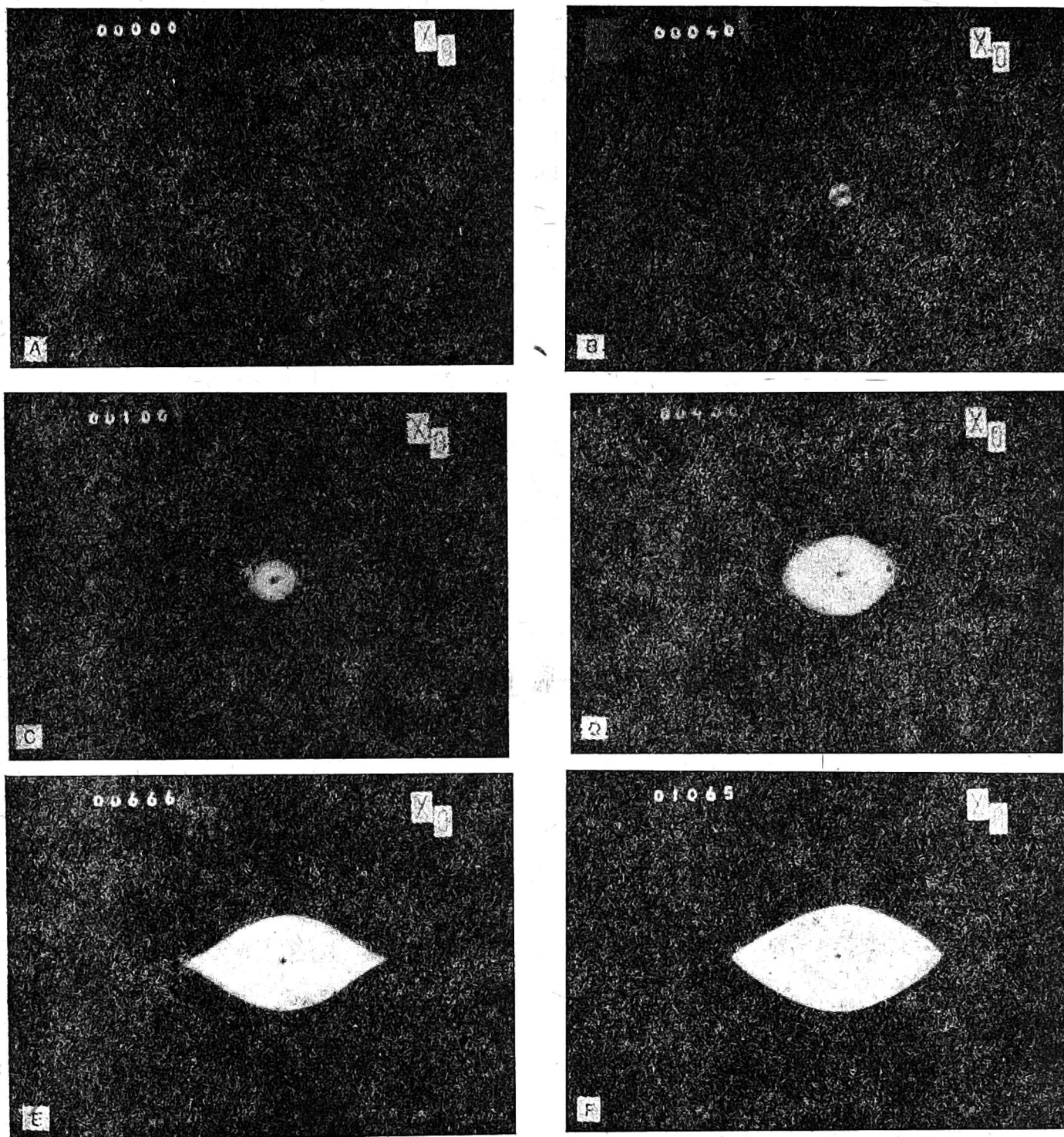
ustawiono w polu widzenia kamery chronometr z odczytem cyfrowym w postaci lamp neonowych o wysokości 30 mm. Dla polepszenia kontrastu osłonięto wskaźniki chronometru „kominkiem” z czarnego kartonu.

Pierwsze doświadczenia posłużyły dopasowaniu oświetlenia płyty modelu do ekspozycji potrzebnej dla wyraźnej rejestracji cyfr chronometru na taśmie filmowej. Próbne zdjęcia zostały wykonane za pomocą aparatu fotograficznego Practica. Z wcześniej przeprowadzonych doświadczeń było wiadomo, że posiadany obiektyw 50 mm od kamery Pentaflex posiada najlepszą ostrość i niezłą zdolność rozdzielczą przy przysłonach 4,5-5,6. Utrzymanie się w zakresie tych przysłon było konieczne, z uwagi na bardzo małe wymiary klatki filmowej i fakt, że rejestracja wskazań chronometru była umieszczona w rogu klatki, gdzie zdolność rozdzielcza obiektywu jest najniższa. W wyniku analizy próbnych zdjęć oświetlenie płyty modelu okazało się zbyt silne; obniżono zatem moc żarówek do 150 W. Pierwsze zdjęcia wykonane kamerą filmową potwierdziły słuszność wyciągniętych z próbnych zdjęć wniosków. Rejestracja fotograficzna czasu i rozplywu na taśmie filmowej była zadowalająca, jednak cień rzucany przez granicę rozplywających się cieczy sytuował się wzdłuż osi rozplywu, co mogłoby znacznie utrudniać analizę i wprowadzać błędy w ocenie ilościowej zjawiska. Z tego powodu zmieniono ustawienie lamp na ukośne — prawie po przekątnej modelu (rys. 5) — oraz zastosowano osłonki rozpraszające na żarówki.



Rys. 5. Poprawione oświetlenie modelu: 1 — płyta modelu, 2 — lampa oświetlająca model, 3 — kontur badanego zjawiska

Wszystkie zdjęcia badawcze zostały wykonane na negatywie czarno-białym NP 55 (wyższa zdolność rozdzielcza niż taśmy barwnej i szybsza obróbka). Pierwszą partię próbną z tego materiału wywołano w koreksie „Koloreta” dla szerokości taśmy 16 mm przy użyciu wywoływacza ultradrobnoziarnistego ORWO A49. Następną partię próbną wywołano maszynowo w wytwórni filmowej w wywoływaczu D 76d. Różnice w rozdzielczości obu taśm były niewielkie, dlatego też zdecydowano się na wygodniejszą obróbkę maszynową.



Rys. 6. Rozpływ płynu symulującego iniekt na modelu szczelinowym przy  $\lambda = 1$  i  $\alpha = 5$ ;  $\lambda$  — stosunek lepkości iniektu do lepkości wody,  $\alpha$  — stosunek natężeń przepływu w studni ssącej do tłoczącej

W pierwszej fazie badań ciecz symulująca iniekt barwiona była na zielono, tło pozostawało białe. Dzięki nieco obniżonej czułości filmu NP 55 w zakresie zieleni rejestracja zjawiska była bardzo dobra. W drugiej fazie badań żółte lub żółto-pomarańczowe oleje rozplýwały się w barwionej na zielono glicerynie, wypełniającej ośrodek. Rejestracja obu barw na czarno-białym negatywie dawała zaczernienie o zbliżonej gęstości optycznej. Zjawisko pozostawało nieczytelne, ze względu na niski kontrast konturu. Dla podwyższenia kontrastowości wykonano próby z zastosowaniem ory-

ginalnych filtrów  $7,5 \times 7,5$  cm do kamery Pentaflex w kolorach pomarańczowym i czerwonym. Ponieważ filtry te mają wysoką krotność (pomarańczowy 3-4 razy, czerwony 8-10 razy) zdecydowano się podnieść poziom oświetlenia modelu poprzez wymianę żarówek z 150 W na 250 W. Pozwoliło to na zadowalającą rejestrację rozplywu w pożądanym zakresie przysłon 4-4,5 przy użyciu filtru pomarańczowego. Czytelność konturu rozplywu jak i wskazań chronometru była dobra. Rejestracja zjawiska przy użyciu filtru czerwonego była kontrastowa, jednak wskazania chronometru eksponowały się bardzo słabo i nieostro już przy przysłonach rzędu 2-2,8.

Zdecydowano się pozostać przy filtrze pomarańczowym. Kontrast znacznie poprawiono poprzez zdjęcia w lekkiej podekspozycji (-0,5 podziałki przysłony) i odpowiednie przedłużenie czasu wywoływania taśmy. Było to możliwe dzięki zastosowaniu elastycznego wywoływacza D 76, przy którym można regulować kontrast negatywu w szerokim zakresie poprzez zmianę czasu wywoływania z minimalną stratą w rozdzielniku.

Po wykonaniu całej serii zdjęć czarno-białych (ok. 200 doświadczeń) zrobiono dla potrzeb projektowanego filmu badawczo-dydaktycznego kilka ujęć na taśmie barwnej NC-3 z dobrym rezultatem. Przykładowe zdjęcia filmowanych rozplywów iniektu zamieszczono na rysunku 6 (A-F).

#### WYNIKI BADAŃ

Cały materiał filmowy z badań został przekopiowany na taśmie pozytywową. Analiza zdjęć przeprowadzona została wyłącznie na tej taśmie w następujący sposób:

— wyszukanie odpowiednich odcinków taśmy na stole montażowym Spefika SM-1,

— analiza (na ekranie z wyskalowaną siatką) wybranych poprzednio odcinków przy użyciu czytnika mikrofilmowego prod. Zeiss.

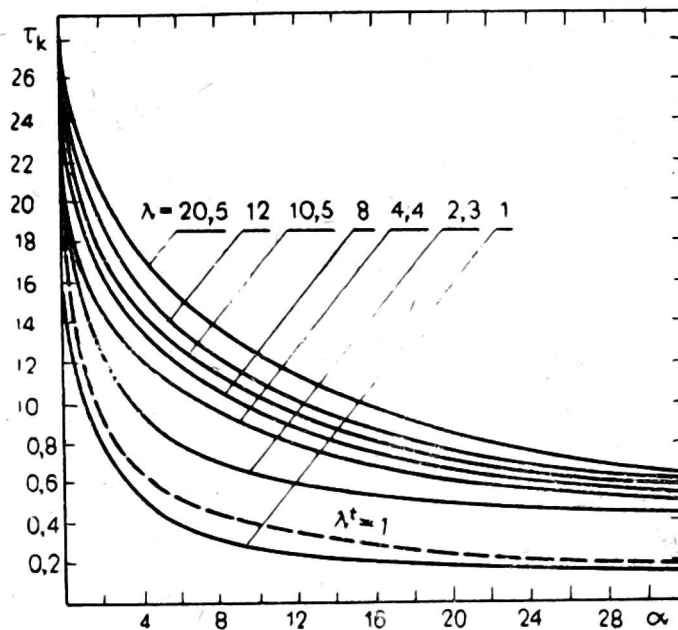
Na podstawie danych otrzymanych z taśmy filmowej ustalono:

— szybkość rozprzestrzeniania się iniektu wzdłuż osi ekranu i w płaszczyźnie prostopadłej do niego w zależności od lepkości iniektu i od natężeń przepływu w studniach ssących i tłoczącej;

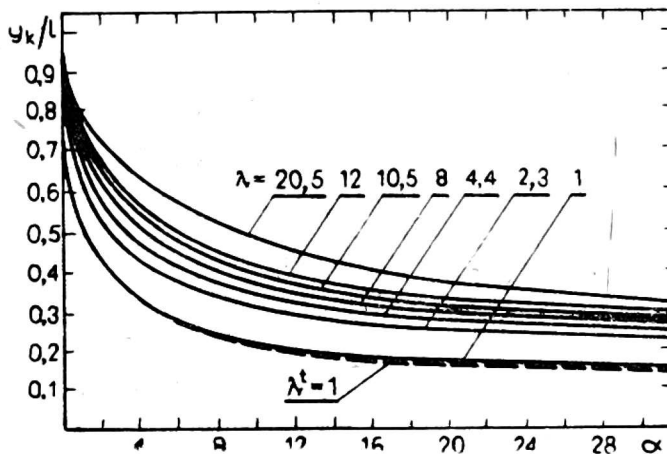
— zależność szerokości ekranu od lepkości użytego iniektu i od stosunku natężenia ssania do tłoczenia.

Dane powyższe posłużyły do wykreślenia nomogramów (rys. 7, 8), na podstawie których można w danych warunkach hydrogeologicznych (przy zastosowaniu iniektu o odpowiedniej lepkości) dla zaprojektowanej szerokości ekranu określić czas iniekcji oraz natężenie przepływu w studniach.



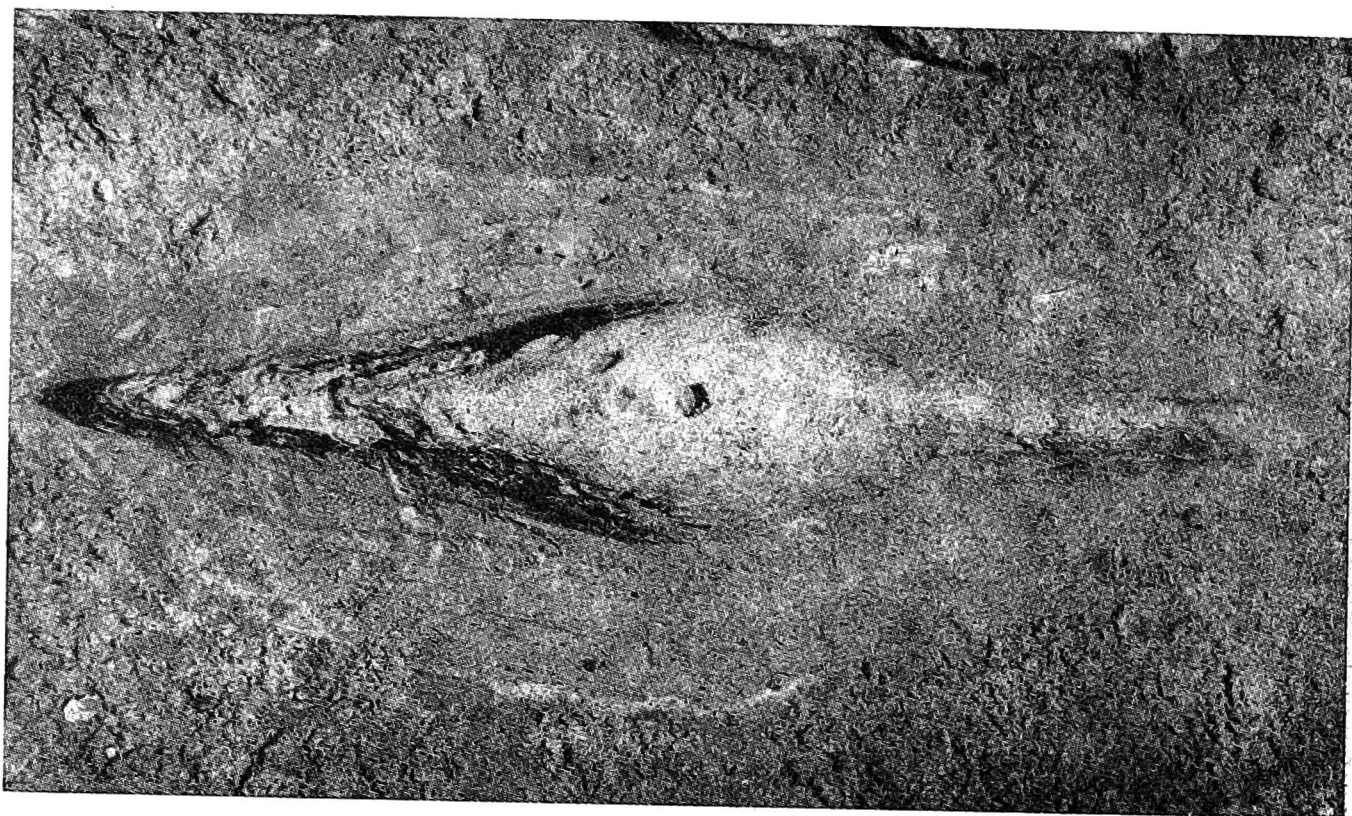


Rys. 7. Czas trwania iniekcji ( $\tau_k$ ) w zależności od lepkości iniektu i od natężeń przepływu w studniach:  $\lambda$  — stosunek lepkości iniektu do lepkości wody,  $\alpha$  — stosunek natężenia przepływu w studni ssącej do natężenia w studni tłoczącej



Rys. 8. Szerokość ekranu w zależności od lepkości iniektu i od natężenia przepływu w studniach:  $d$  — szerokość ekranu ( $d = 2y/l$ ),  $\lambda$  — stosunek lepkości iniektu do lepkości wody,  $\alpha$  — stosunek natężenia przepływu w studni ssącej do natężenia w studni tłoczącej,  $l$  — odległość między studniami

Przydatność nomogramów sprawdzono w doświadczeniach przeprowadzonych na modelu fizycznym w laboratorium. W tym celu w odpowiednio przygotowane złożo gruntowe, symulujące warunki naturalne, wprowadzono 3 studnie. W każdym doświadczeniu studnie wywoływały sterowany przepływ iniektu (zastosowano żywicę MS-10) o różnych lepkościach i przy różnych natężeniach przepływu. Po określonym czasie żelowania usuwano niezeskalony grunt (rys. 9). Porównanie parametrów rzeczywistych w stosunku do określonych z nomogramów potwierdziło przydatność nomogramów, a tym samym dokładność badań empirycznych i słuszność przyjęcia metody techniki filmowej.



Rys. 9. Odsłonięta część ekranu wykonanego na modelu gruntowym przy  $\lambda = 2,3$  i  $\alpha = 32$

Przebadana w wyżej opisany sposób nowa technologia iniekcji może znaleźć zastosowanie do wzmacniania i uszczelniania gruntów przy budowie:

- przepon odcinających spływy zanieczyszczeń,
- ekranów w małych i dużych budowlach hydrotechnicznych,
- zbiorników podziemnych,
- poduszek wzmacniających fundamenty itd.

#### UWAGI I WNIOŚKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania przy użyciu techniki filmowej pozwoliły stwierdzić, że jakość otrzymanych wyników jest ściśle uzależniona od jakości zdjęć. Na dobrą jakość zdjęć w wyżej opisanych doświadczeniach złożył się cały kompleks wprawdzie dobrze znanych, ale oddzielnie niezaniędbywanych zabiegów:

- właściwy dobór taśmy zdjęciowej i wykorzystanie zalet krzywej spektralnej czułości taśmy za pomocą filtrów oraz barwienia cieczy;
- dopasowanie poziomu oświetlenia modelu do poziomu jarzenia się wskaźnika cyfrowego;
- osłonięcie wskaźnika cyfrowego przed światłem lamp oświetlających model;
- dokładne ekranowanie modelu i kamery dla uniknięcia niepożądanych odbić i odblasków;

- odpowiednie ustawienie lamp oświetlających model w celu uniknięcia cieni na granicy faz między cieczami;
- zdjęcia w zakresie „najlepszych” przesłon posiadanego obiektywu;
- celowe dopasowanie ekspozycji i obróbki laboratoryjnej filmu dla osiągnięcia najlepszych rezultatów.

Należy nadmienić, że znacznie lepszą jakość zdjęć można by osiągnąć, używając niedostępnej dla autorów, automatycznej kamery fotograficznej, np. Robot Motor Rekorder typu 24 BE lub 36 BE (maksymalna frekwencja 3 i 2 kl/s) z kasetami na 150 m negatywu o szerokości 35 mm. Wyższy stopień niezawodności można by osiągnąć, stosując kamerę filmową Bolex HR 5 z silnikiem MBF-A i Variotimer (maksymalna frekwencja 2 kl/s) lub tę samą kamerę sprzężoną z urządzeniem typu „single frame device” o maksymalnej frekwencji 4 kl/s. Profesjonalny sprzęt dla tego typu badań produkuje firma John Hadland w Londynie, przy czym należy tu polecić kamerę LOCAM.

*Мария Электронович, Мацей Скуп*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬМОВОЙ ТЕХНИКИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ СТАБИЛИЗАЦИИ И УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВОГРУНТОВ

### Резюме

В статье рассматриваются результаты проведенных при помощи фильмовой техники исследований новой технологии стабилизации почвогрунтов. Описываемые экспериментальные работы касаются уплотнения почвогрунтов при использовании нового метода управляемой инъекции полимеров с целью исключения нетоксических зон от стока загрязнений.

Для получения параметров гидравлически управляемой инъекции проводились исследования на горизонтальной щелевой модели (Геле-Шоу). Фильмирование отдельных опытов с частотой  $\frac{3}{4}$  или 1 клетка в секунду при помощи кинокамеры Пентафлекс 16, а также последующее определение соответствующих параметров на скопированном фильмовом материале с использованием читального аппарата фирмы Цейсс, позволили получить ряд данных необходимых для построения номограмм и провести подробный анализ явления.

В статье описываются отдельные этапы работы, подготовка исследовательского поста приспособленного к фильмовой технике, а также приводятся данные и замечания касающиеся выбора оптимальных условий фильмования исследуемого явления.

*Maria Elektronowicz, Maciej Skup*

FILM TECHNIQUE APPLICATION IN INVESTIGATIONS ON  
STABILIZATION AND SEALING OF SOILS

S u m m a r y

Results of investigations carried out at the film technique application are presented in the paper. The experimental works described concern sealing of soils by the method of controlled injections of polymers with the aim to separate non-toxic zones from flow of contaminants.

To get the parameters of hydraulically controlled injection, investigations on a horizontal fissured model (Hele-Shaw) were carried out. Filming of particular experiments with the frequency of  $3/4$  or 1 frame per second at use of the Pentaflex 16 camera and also owing to determination of appropriate parameters on a copied film material at use of the Zeiss reading apparatus, enabled to get a number of data necessary for plotting nomograms and carrying out a detailed analysis of the phenomenon.

Particular work stages, preparation of the investigation stand adapted to the film technique and data and remarks concerning the choice of optimum conditions of filming of the phenomenon under study are described in the paper.