

Jan Kępiński & Krzysztof Pasierbiewicz

Akademia Górniczo-Hutnicza;
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska;
Katedra Geologii Ogólnej, Ochrony Środowiska i Geoturystyki ,
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: kempinsk@geol.agh.edu.pl
e-mail: pasierb@geol.agh.edu.pl

**MATERIAŁY POMOCNICZE DO ĆWICZEŃ
W LABORATORIUM SEDYMENTOLOGICZNYM
WYDZIAŁU GEOLOGII, GEOFIZYKI I OCHRONY ŚRODOWI-
SKA
AKADEMII GÓRNICZO - HUTNICZEJ**

Kraków, 2010

SPIS TREŚCI

WSTĘP	4
BADANIA MODELOWE JAKO JEDEN Z ELEMENTÓW METODYKI BADAWCZEJ STOSOWANEJ W GEOLOGII	4
RODZAJE MODELI PROCESÓW GEOLOGICZNYCH.....	6
OPIS KONSTRUKCJI MODELU FIZYCZNEGO KORYTA ALUWIALNEGO.....	8
CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH MODELOWANYCH W LABORATORIUM SEDYMENTOLOGICZNYM	121
DANE I PARAMETRY MIERZONE I OBLICZANE W TRAKCIE MODELOWANIA.....	153
KRYTERIA PODOBIENSTWA MODELU I JEGO PIERWOWZORÓW.....	186
HISTORIA EKSPERYMENTALNYCH BADAŃ MODELOWYCH WYKONYWANYCH W LABORATORIUM SEDYMENTOLOGICZNYM	1918
PROCESY MODELOWE DEMONSTROWANE W LABORATORIUM SEDYMENTOLOGICZNYM.....	220
SŁOWNICZEK WYBRANYCH TERMINÓW	285
LITERATURA	3128

WSTĘP

W Laboratorium Sedymentologicznym działającym przy Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, niezależnie od kompleksowych badań naukowych w dziedzinie sedymentologii eksperymentalnej, przeprowadzane są również programowe ćwiczenia laboratoryjne dla studentów. Celem tych ćwiczeń jest zapoznanie ich uczestników ze standardowymi procedurami przeprowadzania eksperymentalnych badań modelowych, które stanowią jeden z nieodłącznych elementów pracy badawczej geologa.

W Laboratorium Sedymentologicznym studenci zapoznają się z konstrukcją fizycznego modelu koryta aluwialnego, oraz z mechanizmami powstawania reprodukowanych w tym modelu struktur sedymentacyjnych. Wyposażenie aparaturowe modelu pozwala studentom na ilościowe, lub pół-ilościowe określenie charakterystyki hydrodynamicznej modelowanego środowiska sedymentacyjnego, jak również określenie typu oraz cech geometrycznych i granulometrycznych powstających w tych warunkach struktur sedymentacyjnych. Zadaniem studentów jest też obserwowanie i wyznaczanie prostych zależności pomiędzy charakterystyką hydrodynamiczną środowiska sedymentacyjnego a typem powstających w określonych warunkach struktur sedymentacyjnych.

W trakcie zajęć można obserwować proces powstawania różnego rodzaju prądowych struktur sedymentacyjnych, zarówno powierzchniowych (różne typy form dna) jak i wewnątrz ławicowych (różne typy warstwowania i laminacji). Studenci mogą też obserwować zmiany morfologii koryta aluwialnego następujące w wyniku zmian charakterystyki hydrodynamicznej przepływu (reżimu przepływu).

Studenci uczą się również, w jaki sposób obserwacje poczynione w trakcie badań modelowych mogą im być w przyszłości pomocne w interpretacji genezy struktur sedymentacyjnych występujących w środowisku naturalnym.

BADANIA MODELOWE JAKO JEDEN Z ELEMENTÓW METODYKI BADAWCZEJ STOSOWANEJ W GEOLOGII

Geolog w trakcie wykonywania prac badawczych powinien stosować się do ściśle określonych reguł metodycznych, które zazwyczaj sprowadzają się do przeprowadzenia logicznej analizy badanego procesu pozwalającej na określenie zależności przyczynowo-skutkowych pomiędzy przyczyną procesu geologicznego, jego przebiegiem i skutkiem, który w naturalnych utworach kopalnych jest zapisany jako charakterystyczny zespół cech, badanego materiału geologicznego określony typ struktury sedymentacyjnej.

Praca badawcza geologa obejmuje zazwyczaj wykonanie kilku następujących po sobie etapów metodycznych, które można opisać w sposób następujący:

- I. Etap pierwszy to dokładna **obserwacja** cech badanego materiału geologicznego.
- II. Etap drugi to propozycja wyjaśnienia przyczyn powodujących powstanie, takich a nie innych struktur sedymentacyjnych, skutkująca postawieniem określonej **hipotezy**, bądź kilku alternatywnych hipotez.
- III. Etap trzeci to udowodnienie słuszności postawionej hipotezy. Do tego celu, między innymi, wykorzystuje się odpowiednio zaprogramowany **ekspery-**

ment, który ewentualnie może potwierdzić słuszność jednej z postawionych hipotez, eliminując pozostałe jako niesłuszne. W tym właśnie kroku mieszczą się **eksperymentalne badania modelowe**, którymi zajmujemy się bardziej szczegółowo w niniejszym skrypcie. W trakcie badań modelowych możemy zbadać doświadczalnie, w kontrolowanych ilościowo warunkach laboratoryjnych, w jaki sposób na badane zjawisko czy proces geologiczny wpływa określony czynnik (w naszym przypadku może to być przykładowo: wpływ prędkości przepływu, natężenie przepływu, koncentracji materiału osadowego w zawiesinie na powstanie określonego typu struktury sedymentacyjnej).

- IV. Etap czwarty to **zmodyfikowanie** postawionej uprzednio hipotezy, lub jej odrzucenie jako niesłusznej, na podstawie wyników przeprowadzonych badań.
- V.
- VI. I wreszcie etap piąty to ostateczne **udowodnienie** słuszności postawionej hipotezy na podstawie wyników całej serii różnorodnych badań lub doświadczeń, co daje podstawę by postawiona uprzednio hipoteza mogła już zostać zaakceptowana jako powszechnie uznawana przez naukę **teoria**.

Podsumowując, metodę badawczą w pracy geologa można zapisać jako ciąg następujących etapów metodycznych:

Obserwacja ⇒ Hipoteza ⇒ Eksperyment (**badania modelowe**) ⇒ Modyfikacja hipotezy ⇒ Teoria

W trakcie ćwiczeń w Laboratorium Sedymentologicznym można prześledzić poszczególne etapy proceduralne omówionej wyżej metody, między innymi, na przykładzie analizy sposobu powstawania laminacji przekątnej.

W tym przypadku etapem pierwszym jest obserwacja cech geometrycznych i granulometrycznych zestawów laminacji przekątnej występującej w skałach (np. laminowanych przekątnie piaskowcach).

Etapem drugim będzie w tym konkretnym przypadku postawienie hipotezy zakładającej, że laminacja przekątna powstaje w dynamicznym środowisku sedymentacyjnym (w rozważanym przypadku będzie to przepływ wody ponad dnem zbudowanym z luźnego materiału piaszczystego), w wyniku migracji form dna (ripplemarków).

Etap trzeci obejmuje przeprowadzenie konkretnego doświadczenia, w trakcie którego, można obserwować w modelu, który w tym przypadku jest modelem fizycznym koryta aluwialnego, proces migracji ripplemarków i towarzyszące temu procesowi powstawanie różnych typów laminacji przekątnej. W trakcie ćwiczenia można w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych dokonać reprodukcji struktur laminacji przekątnej występujących w skałach, uzyskując w laboratorium ich replikę o cechach zbliżonych do struktur obserwowanych w utworach kopalnych, co pozwala na wstępne potwierdzenie słuszności założonej hipotezy, przy jednoczesnym ilościowym, lub pół-ilościowym określeniu charakterystyki środowiska sedymentacji tych struktur.

W ramach etapu czwartego można przeprowadzić dodatkowe doświadczenia nie tylko potwierdzające słuszność postawionej hipotezy, lecz również wyznaczających ściśle określone ilościowo przedziały charakterystyki hydrodynamicznej środowiska sedymentacji (reżimy przepływu), w których powstają modelowane struktury sedymentacyjne.

W etapie piątym sprowadza się już tylko ilościową weryfikację wyników potwierdzających słuszność przyjętej uprzednio hipotezy, która na tym etapie staje się już teorią, mówiącą o tym, że laminacja przekątna może powstać wyłącznie w dynamicznym środowisku sedymentacyjnym o określonej charakterystyce w trakcie przepływu mieszaniny dwufazowej ponad dnem zbudowanym z luźnego materiału piaszczystego. W takich warunkach na dnie koryta aluwialnego tworzą się ciągi riplemarków prądowych migrujących w kierunku przepływu, co z kolei prowadzi do tworzenia się określonego rodzaju zestawów wewnątrz ławicowej laminacji przekątnej oraz struktur powierzchniowych. Ponieważ kanał doświadczalny w Laboratorium Sedymentologicznym ma ściany boczne zbudowane ze szkła, można obserwować „on line” przebieg i mechanizm powstawania modelowanych struktur sedymentacyjnych.

Specjalna konstrukcja modelu i aparatura pomiarowa połączona z odpowiednim oprogramowaniem komputerowym pozwala na dokonywanie bieżących pomiarów w systemie modelowym, jak również umożliwia bieżące przetwarzanie mierzonych danych na parametry i wykresy charakteryzujące hydrodynamikę modelowanego środowiska sedymentacji.

RODZAJE MODELI PROCESÓW GEOLOGICZNYCH

Przebieg większości procesów geologicznych można w bardziej lub mniej doskonały sposób modelować. W niniejszym skrypcie zostaną pokrótce omówione trzy podstawowe typy modeli stosowanych w geologii, a mianowicie 1. modele pojęciowe, 2. modele matematyczne i 3. modele fizyczne.

1. Modele pojęciowe

Modele pojęciowe to modele teoretyczne konstruowane przez badacza bez używania do tego celu żadnych narzędzi. W uproszczeniu można powiedzieć, że są to modele „tworzone w naszych głowach”. Model pojęciowy można zdefiniować jako logiczny ciąg zależności przyczynowo skutkowych zachodzących pomiędzy czynnikami wpływającymi na wywołanie, przebieg oraz skutek danego procesu geologicznego. Modele takie można często spotkać w podręcznikach, gdzie są przedstawiane w formie graficznej, tabelarycznej, bądź innej.

Przykładowo, bardzo uproszczony model pojęciowy przepływu mieszaniny wody i materiału o

sadowego w korycie aluwialnym (w rzece, strumieniu, prądzie podmorskim itp.) można przedstawić następująco:



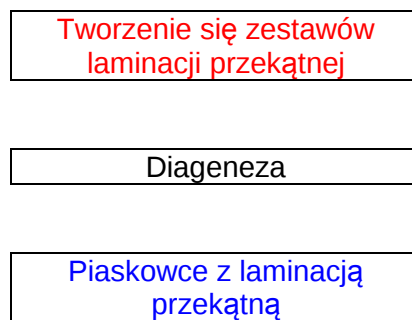


Fig. 1. Model pojęciowy przedstawiający związki przyczynowo-skutkowe w trakcie tworzenia się warstwowania przekątnego

Uwaga !

Kolorem **zielonym** zaznaczono przyczyny modelowanego procesu
 Kolorem **czerwonym** zaznaczono przebieg modelowanego procesu
 Kolorem **niebieskim** zaznaczono skutek modelowanego procesu

2. Modele matematyczne

Modele matematyczne opisują za pomocą wzorów przejście od jakościowej do ilościowej analizy lub zjawiska. Po wprowadzeniu stosownych danych (zebranych w trakcie geologicznych prac terenowych) model taki przy pomocy urządzenia przeliczającego (program komputerowy) odpowiednio te dane przetwarza, wyznaczając określone zależności pomiędzy zmiennymi i parametrami decydującymi o przebiegu (symulacji) badanego procesu geologicznego. Otrzymane wyniki mogą być przedstawione w formie liczbowej, tabelarycznej, opisowej bądź graficznej (wykresy, schematy, blokdiagramy itp.) Mówiąc inaczej modele matematyczne są to odpowiednio skonstruowane programy komputerowe wykorzystywane w geologii.

3. Modele fizyczne

Odtwarzają one w warunkach laboratoryjnych naturalne procesy sedymentacyjne. Np. proces powstawania struktur sedymentacyjnych modelowanych w doświadczalnym basenie. Badanie procesów zachodzących w dużej skali wymaga stosowania modeli redukcyjnych, w których naturalne zjawiska są odtwarzane w skali zmniejszonej. Przy badaniach ilościowych na modelach zmniejszonych wyniki badań i pomiarów mogą być odnoszone do pomiarów mogą być odnoszone do procesów zachodzących w przyrodzie, jeśli model spełnia określone warunki, umożliwiające zachowanie stałej skali zmniejszenia, a zatem podobieństwo modelu m do pierwotnego p ,
 Warunki te dotyczą:

- **podobieństwa geometrycznego:** stosunek odpowiadających sobie wymiarów liniowych L (np. stosunek głębokości do szerokości koryta rzecznoego) w modelu m i w pierwotnym p musi być stały.
- **podobieństwa kinematycznego:** tj. podobieństwa ruchu: stosunki prędkości ruchu i przyspieszeń w modelu i pierwotnym muszą być takie same. Oba stosunki są za-

leżne od stosunku czasu w układzie modelu i w układzie pierwowzoru, który jest zależny od skali zmniejszenia S . W praktyce dla modeli sedymentologicznych stosunek prędkości opadania ziarn w płynie i stosunek prędkości przepływów w modelu i w pierwowzorze muszą być równe skali zmniejszenia S ;

- **podobieństwa dynamicznego**, tj. podobieństwa sił działających na ciała w ruchu. Model jest podobny dynamicznie do pierwowzoru, gdy stosunek wszystkich sił działających na odpowiadające sobie ciała (np. ziarna osadu, cząstki płynu) w modelu i w pierwowzorze jest stały. Dla procesów transportu i sedymentacji powinien być zachowany stały stosunek sił ciśnień, ciężkości, lepkości, sprężystości i napięcia powierzchniowego płynu w modelu i w pierwowzorze. Równoczesne spełnienie wszystkich warunków i zachowanie pełnego podobieństwa dynamicznego modelu do pierwowzoru jest praktycznie niemożliwe. Dobre wyniki uzyskuje się jednak, jeśli model zachowuje dynamiczne podobieństwo do pierwowzoru w odniesieniu do głównych sił, przy pominięciu sił mniej ważnych dla badanego procesu. Dla modelowania procesów sedymentacyjnych szczególnie ważne jest zachowanie stałej wartości liczby Reynoldsa w modelu i w pierwowzorze (Re).

W badaniach procesów, w których występują układy o uwarstwieniu gęstościowym, konieczne jest zachowanie stałej wartości liczby Reynoldsa w modelu i w pierwowzorze. Wymaganie to jest spełnione, gdy różnice gęstości ρ w układzie są takie same w modelu i w pierwowzorze.

Pewne odstępstwa od przedstawionych zasad są w praktyce nieuniknione i modele fizyczne są z reguły uproszczonymi przybliżeniami sytuacji istniejących w przyrodzie. Uproszczenia takie są dopuszczalne, pod warunkiem ich dokładnego sprecyzowania. Jest to niezbędne dla upewnienia się, czy wyniki różnych doświadczeń są ze sobą porównywalne czy też nie, oraz dla określenia ograniczeń we wnioskowaniu na podstawie wyników doświadczeń, będących konsekwencją uproszczeń modelu. Przykładem modelu fizycznego jest opisywany model fizyczny koryta aluwialnego, gdzie za koryto aluwialne uważa się naturalny ciek wodny, w którym mieszanina wody i materiału osadowego przepływa nad dnem zbudowanym z luźnego materiału ziarnistego, mogąc ten materiał transportować.

OPIS KONSTRUKCJI MODELU FIZYCZNEGO KORYTA ALUWIALNEGO

Model znajdujący się w Laboratorium Sedymentologicznym jest modelem fizycznym kanału aluwialnego (ang. alluvial channel). Jak już wspomniano, korytami aluwialnymi nazywa się różnego rodzaju naturalne ciek wodne, w których mieszanina wody i materiału osadowego przepływa ponad nie skonsolidowanym dnem zbudowanym z materiału ziarnistego, mogąc ten materiał w określony sposób transportować. Główną częścią opisywanego modelu jest kanał doświadczalny, w którym woda przepływa ponad dnem zbudowanym z materiału ziarnistego (zależnie od specyfiki doświadczenia może to być np. łą, piasek lub żwir).

Ponieważ przepływ w kanale doświadczalnym musi być stały i odpowiednio duży, zasilanie koryta doświadczalnego wodą z sieci wodociągowej byłoby niemożliwe. Dlatego też w systemie modelowym zastosowano recyrkulacyjny obieg wody, polegający na tym, że system modelowy wypełnia się określoną i stałą ilością wody, która krąży w systemie w wyniku pracy pompy wirowej wbudowanej w rurociąg. Rozwiązanie takie pozwala na uzyskanie w samym kanale doświadczalnym jednokierunkowego, ustalonego przepływu wody z materiałem osadowym.

Aby zapewnić w możliwość odtwarzania w kanale doświadczalnym warunków zbliżonych do tych panujących w naturalnych korytach aluwialnych (na przykład przepływie rzeczny), model musiał zostać tak skonstruowany by można było w za-

leżności od specyfiki wykonywanej serii doświadczalnej, odpowiednio zmieniać takie parametry jak: prędkość przepływu mieszaniny woda-osad, natężenie przepływu, głębokość przepływu, spadek hydrauliczny, oraz gęstość mieszaniny woda-osad.

Jak już wspomniano, kluczowym elementem systemu modelowego jest kanał doświadczalny, w którym dokonuje się stosownych symulacji, pomiarów i obserwacji (Pasierbiewicz, 1975, 1982, 1997). W kanale tym modeluje się przepływy wodnych zawiesin ilastych bądź ilasto - piaszczystych o zmiennej charakterystyce hydrodynamicznej.

System zasilany jest materiałem osadowym poprzez zewnętrzne urządzenie zasilające, umożliwiające okresowe dodawanie do mieszaniny krążącej w systemie nowych porcji materiału osadowego o określonej ilości i granulometrii.

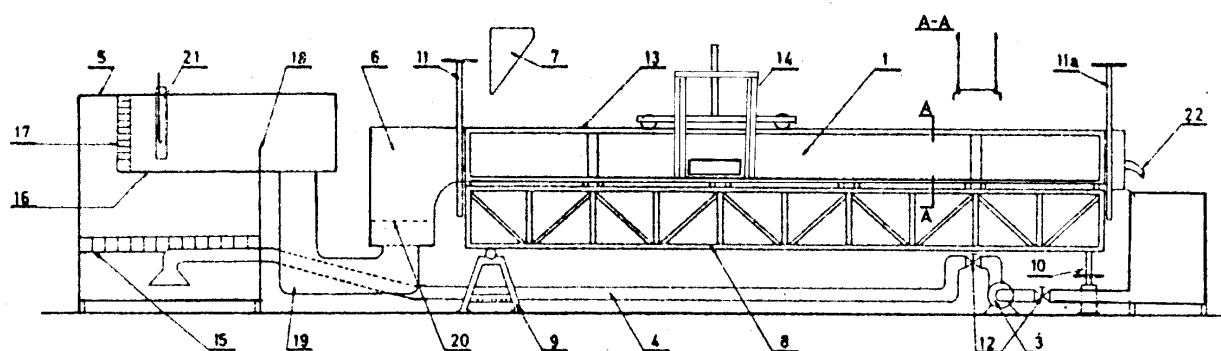


Fig. 2. Schemat aparatury modelowej.

1 – koryto doświadczalne (kanał przepływowy), 2 – zbiornik odbiorczy, 3 – pompa ssąco-tłocząca, 4 – rurociąg, 5 – zbiornik zasilający, 6 – segment doprowadzający, 7 – urządzenie zasilające przepływ materiałem osadowym, 8 – kratownica nośna koryta doświadczalnego, 9 – stała podpora przegubowa, 10 – podnośnik śrubowy służący do regulacji spadku koryta, 11 i 11a – przegrody poprzeczne, 12 – zasuwy klinowe do regulacji natężenia przepływu, 13 – szyny urządzenia pomiarowego, 14 – urządzenie pomiarowe, 15 kratka tłumiąca, 16 – płyta oddzielająca segment z przelewem od zbiornika wody, 17 – kierownica, 18 – przelew trójkątny do pomiaru objętości przepływu, 19 – syfon, 20 – kratka tłumiąca turbulencję wody wpływającej do koryta doświadczalnego, 21 – wodowskaz, 22 - próbnik szczelinowy.

Funkcje poszczególnych podzespołów konstrukcyjnych modelu:

1. Kanał doświadczalny (kanał przepływowy), jest zasadniczym elementem modelu, w którym dokonuje się obserwacji modelowanych procesów oraz dokonuje się pomiarów parametrów hydraulicznych i sedymentologicznych. Kanał jest wykonany profili stalowych, a jego wymiary wynoszą: długość - 500 cm, szerokość – 50 cm, wysokość – 40 cm. Przekrój kanału jest prostokątny. Ściany boczne wykonano ze szkła o grubości 6 mm, co umożliwia bezpośrednią obserwację modelowanego procesu.



Fig. 3. Widok ogólny kanału doświadczalnego

2. **Zbiornik odbiorczy** - służy do odbierania wody wypływającej z koryta doświadczalnego, oraz „magazynowania” wody zasilającej system modelowy.
3. **Pompa wirowa** - firmy Grunfos, o odpowiedniej wydajności, służy do wprowadzania wody wypełniającej model w ruch recyrkulacyjny.
4. **Rurociąg** o średnicy 60 mm służy do przepompowywania wody pomiędzy zbiornikiem odbiorczym a zbiornikiem zasilającym. Średnica rurociągu jest uwarunkowana uzyskaniem optymalnie dużego natężenia przepływu w kanale doświadczalnym.
5. **Zbiornik zasilający** wykonany z blachy, służy jako zasobnik na wodę wpływającą do koryta doświadczalnego.
6. **Segment doprowadzający**, jest elastycznym łącznikiem pomiędzy zbiornikiem doprowadzającym a kanałem doświadczalnym, umożliwiającym dokonywanie zmian położenia dna kanału doświadczalnego przy regulacji jego nachylenia (spadku hydraulicznego).
7. **Urządzenie zasilające system materiałem osadowym**, jest to specjalnie skonstruowany pojemnik na materiał osadowy umożliwiający równomierne i kontrolowane dodawanie tego materiału (np. pył, piasek, żwirek) do przepływającej w modelu strugi cieczy.
8. **Konstrukcja nośna** jest elementem, na którym spoczywa kanał doświadczalny (kanał przepływowy). Ze względu na duży ciężar wody zmieszanej z materiałem osadowym znajdującej się w kanale doświadczalnym (rzędu kilkuset kilogramów) konstrukcja nośna jest kratownicą o odpowiedniej wytrzymałości na obciążenie.
9. **Stała podpora przegubowa** stanowi element podpierający wlotową część kanału doświadczalnego, które przy zmianach spadku hydraulicznego zmienia swoje nachylenie.
10. **Podnośnik śrubowy** służy do regulacji nachylenia kanału doświadczalnego w celu uzyskania określonej wartości spadku hydraulicznego. Element ten współpracuje z podporą przegubową.
- 11 i 11a. **Ruchome przegrody poprzeczne**, są elementami służącymi do regulacji głębokości przepływu w kanale doświadczalnym. Przy dolnym położeniu przegród (dno równe na całej długości koryta) materiał transportowany przez wodę osadza się na całej długości koryta na dnie, którego powstają określonego rodzaju struktury sedymentacyjne. Natomiast przy podniesieniu zasuw na określoną wysokość można uzyskać zamkniętą przestrzeń kanału doświadczalnego wypełnioną wodą stojącą. W takich warunkach zdeponowany uprzednio materiał osadowy po pewnym czasie ulega konsolidacji, co z kolei umożliwia wycinanie odpowiednich trójwymiarowych próbek, na których można zaobserwować cechy geometryczne po-

wstałych struktur sedymentacyjnych, uwidaczniające się w trzech wzajemnie do siebie prostopadłych płaszczyznach.

12. **Zasuwy klinowe** wbudowane w rurociąg służą do regulacji natężenia przepływu w kanale doświadczalnym, zapewniając tym samym, w zależności od specyfiki doświadczenia, możliwość uzyskania w kanale doświadczalnym odpowiedniej prędkości przepływu mieszaniny woda – osad.
13. **Szyny urządzenia pomiarowego** umożliwiają ruch wózka z zamontowanymi na nim miernikami wzdłuż koryta doświadczalnego.
14. **Urządzenie pomiarowe (wózek)** jest konstrukcją, na której można montować odpowiednie mierniki i czujniki służące do pomiarów wielkości stosownych parametrów wpływających na modelowany proces; takich jak m.in. czujnik punktowy służący do pomiaru elewacji form dna oraz do określenia elewacji powierzchni zwierciadła przepływającej wody oraz urządzenie izotopowe służące do ciągłego pomiaru koncentracji mieszaniny wody i materiału osadowego.
Konstrukcja czujnika punktowego umożliwia dokonywanie pomiarów geometrycznych w trzech wymiarach. Czujnik wyposażony jest w trzy skale: pionową (pomiar elewacji), podłużną – (pomiar w osi podłużnej koryta), oraz poprzeczną (pomiar poprzeczny w stosunku do kierunku przepływu). Na odpowiednich wysięgnikach można również zamontować kamerę monitorującą modelowany proces.

Miernik izotopowy służący do pomiaru koncentracji materiału osadowego w zawieszynie woda-osad przepływającej w kanale doświadczalnym. W przypadku zastosowania w laboratorium miernika izotopowego, możliwy jest pomiar „on line” koncentracji materiału osadowego w przepływającej strudze, co znacznie ułatwia i przyspiesza pomiar. Specjalnie skonstruowany układ dwóch źródeł izotopowych umożliwia śledzenie nawet niewielkich fluktuacji koncentracji zawiesziny na krótkim odcinku. Pozwala on na dokonywanie natychmiastowego pomiaru wielkości mierzonego parametrów, którymi mogą być – gęstość przepływu bądź jego prędkość.

Zestaw służący do pomiaru gęstości zawiesziny przepływającej w korycie doświadczalnym działa na zasadzie absorpcji promieniowania γ . Zasadę pomiaru gęstości zobrazowano schematycznie na Figurze 4.

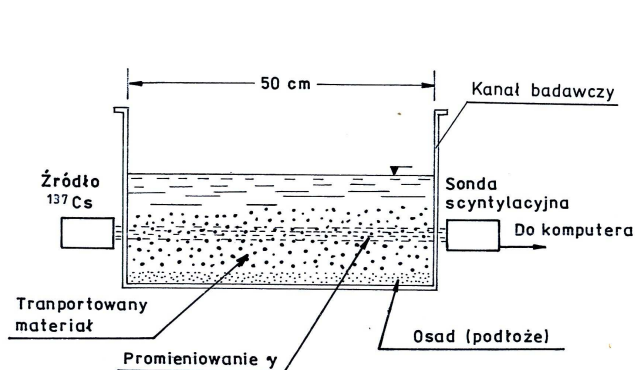


Fig. 4. Schemat urządzenia izotopowego służącego do ciągłego pomiaru gęstości materiału osadowego transportowanego w zawieszynie

Jak widać na powyższym schemacie, przez przepływającą w kanale doświadczalnym strugę będącą mieszaniną wody z materiałem osadowym przechodzi wiązka protonów emitowanych ze źródła promieniotwórczego. Odczytywane, chwilowe wartości gęstości są wyświetlane na ekranie komputera obsługującego pomiar, co więcej wahania gęstości w czasie eksperymentu, pokazywane są na odpowiednim wykre-

się. Istnieje możliwość dobierania częstotliwości próbkowania gęstości oraz czasu odświeżania wykresu.



Fig. 5 Urządzenie pomiarowe z miernikami i czujnikami

- 15 **Krata tłumiąca** jest wbudowana w zbiornik zasilający, a jej głównym zadaniem jest tłumienie turbulencji wody wypływającej z rurociągu zasilającego.
- 16 **Płyta oddzielająca** segment z przelewem od zbiornika jest elementem wspomagającym tłumienie ruchu turbulentnego cieczy. Dzieli ona zbiornik zasilający na dwa niezależne segmenty.
17. **Krata tłumiąca** ukierunkowująca odpowiednio strugę cieczy wpływającej na przelew trójkątny.
18. **Przelew trójkątny** zwany przelewem Thompsona służy do pomiaru natężenia przepływu w systemie modelowym.
19. **Syfon** jest elementem elastycznym doprowadzającym wodę ze zbiornika zasilającego do elementu wlotowego koryta doświadczalnego.
20. **Krata tłumiąca** służy do wytłumienia ruchu turbulentnego cieczy.
21. **Wodowskaz** służy do pomiaru rzędnej wysokości lustra wody przepływającej ponad krawędzią przelewu trójkątnego. Znając tę wysokość, z odpowiednich tablic można odczytywać aktualną wartość natężenie przepływu w systemie modelowym.
22. **Próbnik szczelinowy** służy do pomiaru gęstości na odpowiedniej wysokości przepływu

CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH MODELOWANYCH W LABORATORIUM SEDYMENTOLOGICZNYM

Badania laboratoryjne mające na celu odtwarzanie prądowych struktur form depozycyjnych są bardzo pomocne w interpretacji mechanizmów sedymentacji tych struktur sedymentacyjnych. Celem takich badań jest reprodukcja znanych z obserwacji polowych struktur sedymentacyjnych w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, a następnie ustalenie kryteriów hydraulicznych wpływających na powstawanie określonych typów tych struktur. Znając takie kryteria wyznaczone w trakcie laboratoryjnych badań modelowych, stosując analizę porównawczą, można je przetransponować na ich kopalne odpowiedniki.

Badania modelowe wykonywane w Laboratorium Sedymentologicznym są badaniami ilościowymi mającymi na celu określenie: związku pomiędzy typem reproduk-

wanej struktury sedymentacyjnej a charakterystyką hydrodynamiczną środowiska sedymentacji; określenie mechanizmu tworzenia się tych struktur; wyznaczenie granicznych limitów hydraulicznych inicjujących powstawanie poszczególnych odmian strukturalnych, oraz określenie charakteru przepływu wytwarzającego dany typ struktury sedymentacyjnej.

Ostatecznym celem badań jest ustalenie matematycznych zależności funkcyjnych pomiędzy typem struktury a hydrodynamiką przepływu i charakterystyką materiału osadowego. Większość obliczeń opartych jest na zasadach i wzorach hydrauliki i hydromechaniki klasycznej.

W hydromechanice klasycznej zjawisko przepływu w korycie otwartym zostało dokładnie zbadane i opisane dla warunków przepływu wody ponad płaskim i sztywnym dnem. Natomiast w przypadku koryta aluwialnego mamy do czynienia z przepływem mieszaniny w kanale, którego dno i brzegi są zbudowane z bardziej lub mniej zwięzłego materiału osadowego, który może być transportowany przez przepływającą strugę cieczy (ściany i dno koryta nie są sztywne a ich granice mogą się zmieniać). Zależnie od siły strumienia ziarna materiału osadowego mogą być podrywane (saltacja), toczone po dnie (trakcja) lub unoszone przez strugę cieczy w zawiesinie (suspensja). Tego rodzaju system hydrodynamiczny jest znacznie bardziej złożony i wymaga stosowania w obliczeniach wzorów empirycznych.

Z fizycznego punktu widzenia w kanale doświadczalnym mamy do czynienia z dwufazowym systemem dynamicznym ziarno – ciecz, w którym oprócz normalnej siły oporu przepływu, jaka działa na granicy statycznego podłoża i przepływającej nad nim strugi cieczy, występują również siły powodowane obecnością ziaren w przepływającej strudze cieczy. W systemie zachodzi wzajemna współreakcja pomiędzy ziarnami a cieczą. W efekcie początkowo statyczne i płaskie dno staje się niestabilne i zostaje pokryte formami dna, których typ zależy od charakterystyki hydrodynamicznej modelowanego przepływu.

Proces transportu materiału ziarnowego przebiega w polu grawitacyjnym Ziemi. Można wydzielić dwa główne rodzaje tego transportu:

- zachodzący pod działaniem siły ciężkości, kosztem energii potencjalnej przemieszczanego materiału; jest to **transport grawitacyjny**, właściwy dla ruchów masowych skał i nieskonsolidowanych osadów;
- zachodzący pod działaniem siły przepływu płynu, kosztem energii kinetycznej; jest to **transport hydrauliczny**, który ma miejsce np. w rzekach, prądach morskich, pod wpływem falowania oraz przy zjawiskach fenowych.

Transport hydrauliczny możemy opisać za pomocą trzech grup zmiennych:

- **zmienne związane z przepływem mieszaniny woda – materiał osadowy**

Q – natężenie przepływu,

H_{sr} – średnia głębokość przepływu,

S – spadek hydrauliczny,

γ – ciężar właściwy

- **zmienne związane z transportowanym osadem:**

Q_o – natężenie transportu materiału osadowego,

d_{50} – średnia średnica ziarna materiału osadowego,

ω – zastępcza prędkość opadania ziaren w wodzie,

δ - współczynnik wysortowania materiału osadowego,

S_k - współczynnik zależny od kształtu ziaren,

ρ_o - gęstość materiału osadowego.

- zmienne związane z kanałem przepływowym:

B - szerokość koryta,

S_c - współczynnik zależny od przekroju poprzecznego koryta,

S_r - współczynnik zależny od krętości koryta, biegu strumienia

K_{dn} - typ konfiguracji dna / rodzaje form dna występujących na dnie kanału sedymentacyjnego/.

W modelowanych w Laboratorium warunkach dwu fazowy system dynamiczny ziarno-ciecz zmierza do osiągnięcia stanu równowagi, lub mówiąc inaczej do wystąpienia w systemie modelowym warunków przepływu zrównoważonego, który w ogólny sposób można zapisać funkcją:

$$\Phi(Q, h_{sr}, S, \gamma, Q_o, d_{50}, V_o, \delta, S_k, \rho_o, B, S_r, S_r, K_{dn}) = 0$$

Równanie to oznacza, że wszystkie zmienne występujące w tym równaniu są od siebie wzajemnie współzależne, a zmiana którejkolwiek z nich pociąga za sobą stosowne zmiany pozostałych zmiennych. Aby modelowanie przeprowadzić w sposób wyczerpujący trzeba zbadać wpływ na modelowany proces każdej ze zmiennych występujących w powyższym równaniu, uznając ją w danej serii badawczej za zmienną niezależną (kontrolowaną przez badacza).

Przed rozpoczęciem doświadczenia (serii doświadczeń) należy ustalić, która ze zmiennych będzie w tym przypadku zmienną niezależną. Następnie ustala się plan danego doświadczenia (zakres zmienności zmiennej niezależnej). Zakres ten zależy w praktyce od wielkości modelu oraz jego możliwości technicznych. Następnie zmieniając odpowiednio wartości zmiennej niezależnej badamy jej wpływ na pozostałe zmienne, które w danym doświadczeniu są zmiennymi zależnymi (są to te, które zależą od warunków narzuconych na system modelowy).

Następnym etapem jest obliczenie odpowiednich parametrów określających charakterystykę hydrodynamiczną przepływu (parametry hydrauliczne) i charakterystykę powstałych struktur sedymentacyjnych (parametry geometryczne i granulometryczne), przy zachowaniu kryteriów podobieństwa modelu do jego pierwowzoru.

Końcowym etapem modelowania jest opracowanie wyników. Polega ono na określeniu zależności funkcyjnych pomiędzy poszczególnymi zmiennymi oraz ich wpływu na modelowany proces.

DANE I PARAMETRY MIERZONE I OBLICZANE W TRAKCIE MODELOWANIA

1. Dane mierzone

Q – natężenie przepływu, jest miarą objętości mieszaniny wody i materiału osadowego przepływającej przez jednostkowy przekrój w jednostkowym czasie, której wielkość oblicza się przy wykorzystaniu trójkątnego przelewu Thompsona.

h_{sr} – średnia głębokość przepływu. Ponieważ dno koryta doświadczalnego w trakcie doświadczenia jest pokryte różnego rodzaju nierównościami (formami dna), dlatego wartość głębokości przepływu należy wyrażać wielkością średnią. W tym celu pomiarów rzędnej elewacji powierzchni dna dokonuje się w kilku różnych punktach, zarówno w zagłębieniach pomiędzy riplemarkami jak i na ich grzbietach. W podobny sposób mierzy się stosownie pofalowaną powierzchnię lustra przepływającej strugi mieszaniny woda-osad. Wyniki pomiarów przedstawia się na stosownych wykresach lub w formie tabelarycznej. Wielkość tę wyraża się w metrach.

S – spadek hydrauliczny, jest to stosunek różnicy rzędnej zwierciadła wody mierzonej w części wlotowej i wylotowej kanału doświadczalnego do jego długości, na której ta różnica wystąpiła.

2. Parametry obliczane.

Celem ilościowego scharakteryzowania warunków hydrodynamicznych modelowanego środowiska sedymentacji w trakcie badań modelowych oblicza się następujące parametry:

V_{sr} – średnia prędkość przepływu,

Chcąc precyzyjnie obliczyć średnią prędkość przepływu musimy uwzględnić opory przepływu występujące w czasie ruchu cieczy ponad dnem zbudowanym z materiału ziarnistego.

W tym celu oblicza się współczynniki:

Współczynnik oporu przepływu Darcy – Weisbach'a: - jest współczynnikiem bezwymiarowym zależnym od liczby Reynolds'a i rzeźby powierzchni ograniczającej przepływ. Istotne znaczenie ma tutaj względna szorstkość. Większa szorstkość wzmacnia turbulencję i zwiększa opory przepływu. Wskazuje on na proporcjonalność opory do kwadratu prędkości, gęstości płynu i powierzchni przekroju ziarna. Zależy on od ziarnowej liczby Reynolds'a i kształtu ziarna.

Współczynnik oporu przepływu Chezy'ego: - jest liczbą mianowaną ($m^{1/2}s^{-1}$) i jest związany ze współczynnikiem przepływu Darcy – Weisbach'a

Współczynnik oporu przepływu Manning'a: - współczynnik szorstkości, którego wartość należy przyjmować z tabel w zależności od rodzaju materiału osadowego znajdującego się na dnie koryta doświadczalnego.

Promień hydrauliczny, który jest stosunkiem powierzchni przekroju poprzecznego koryta do długości obwodu zwilżonego.

Współczynniki te są parametrami określającymi wielkość oporu przepływu w korycie aluwialnym.

Najbardziej wyczerpującą analizę prądowych struktur depozycyjnych (form dna) podali Guy et al. (1966) oraz Simons i Richardson (1966). Zasadniczy kierunek ich badań zmierzał do określenia oporu przepływu w korytach aluwialnych, jak również do określenia zależności funkcyjnych warunkujących powstawanie poszczególnych form dna w zależności od oporu przepływu.

Przy wzrastającej sile strumienia, w korycie aluwialnym o dnie zbudowanym z ziaren o średnicy mniejszej niż 0,6 mm, na dnie koryta tworzą się kolejno następujące formy dna: 1) płaskie dno bez poruszającego się nad nim materiału osadowego; 2) riplemarki; 3) riplemarki na wydmach podwodnych; 4) wydmy podwodne; 5) płaskie dno z poruszającym się nad nim materiałem osadowym (przesłoną trakcyjną); 6) wydmy wsteczne oraz 7) rynny i baseny erozyjne.

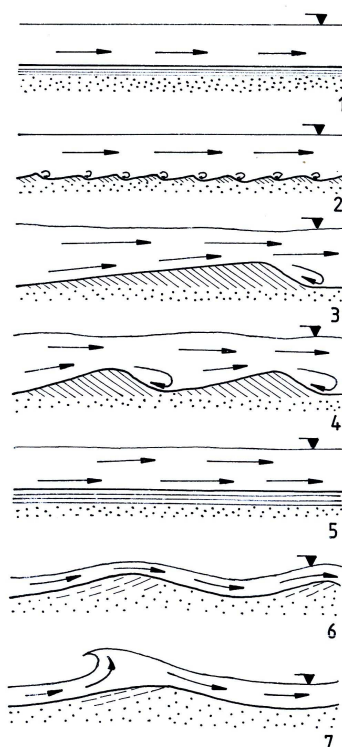


Fig. 6. Kolejność występowania na dnie koryta aluwialnego form dna przy wrastającej sile strumienia

Występowanie określonych typów form dna zależy również od reżimu przepływu kształtującego te formy. W zależności od wartości współczynników oporu przepływu wyróżnia się:

Dolny reżim przepływu

- 1) riplemarki
- 2) wydmy podwodne

Górny reżim przepływu

- 1) płaskie dno z przesłoną
- 2) wydmy wsteczne
- 3) rynny erozyjne

Reżim przepływu jest to pewien zakres charakterystyki hydrodynamicznej przepływu, w którym tworzą się formy dna charakteryzujące się podobnymi wartościami oporu stawianego przepływającej ponad nimi strudze mieszaniny woda – osad.

W górnym reżimie przepływu na dnie koryta aluwialnego powstają: płaskie dno z przesłoną trakcyjną oraz rynny i baseny erozyjne. W tym przypadku opór przepływu jest mały, a transport materiału osadowego bardziej intensywny.

Dolny reżim przepływu to rodzaj przepływów, przy których na dnie koryta powstają riplemarki lub wydmy podwodne. Z hydraulicznego punktu widzenia przepływy te odpowiadają warunkom przepływu spokojnego. W tym przypadku undulacje powierzchni zwierciadła wody są przesunięte w fazie w stosunku do undulacji dna, a opór przepływu w tym reżimie jest stosunkowo duży.

Ponieważ na skutek tarcia strugi przepływającej ponad dnem uziarnionym prędkość przepływu jest inna przy dnie niż w wyższych partiach przepływającej strugi cieczy, ważnym parametrem jest **rozkład prędkości przepływu w pionie**

Równie ważnym parametrem, określającym warunki uruchomienia przez przepływ materiału budującego dno koryta, jest **prędkość ścinająca**, która jest pewną krytyczną prędkością przepływu, przy której w modelowanych warunkach zostaje zainicjowany ruch ziaren materiału osadowego spoczywających na dnie koryta aluwialnego.

Typ oraz rozwój form dna w korycie aluwialnym zależy też od ilości materiału osadowego transportowanego przez przepływającą w tym korycie strugę mieszaniny woda – osad. Dlatego w badaniach oblicza się **natężenie transportu materiału osadowego**.

Zarówno lepkość dynamiczna jak i lepkość kinematyczna muszą być wyznaczone dla określonej wielkości temperatury.

Parametrem będącym miarą wielkości sił związanych z oporem przepływu i transportem cząstek materiału osadowego jest **naprężenie styczne przy dnie**.

Liczba Reynolds'a – określa siły oporu wywierane na opadające ziarno, zależą od średnicy ziarna, jego prędkości i lepkości płynu.

Liczba Reynolds'a jest wartością bezwymiarową i ma istotne znaczenie dla określenia charakteru przepływu. Przy krytycznej wartości liczby ok. 1×10^4 ruch płynu zmienia się z laminarnego na turbulentny. Wartości liczby Reynolds'a w naturalnych korytach aluwialnych osiągają bardzo duże wartości, dlatego te przepływy są z reguły turbulentne.

Wartości graniczne liczby Reynolds'a wynoszą:

ruch laminarny $Re > 2100$, (uporządkowany),

ruch przejściowy $2100 < Re < 3000$, (częściowo uporządkowany),

ruch turbulentny $3000 < Re < 500000$, (burzliwy),

Podane powyżej granice są umowne i zależą one od cytowanych źródeł.

Liczba Froude'a jest parametrem bezwymiarowym wyrażającym stosunek prędkości przepływu do prędkości rozchodzenia się fal grawitacyjnych.

Znając liczbę Froude'a możemy określać tak zwany reżim przepływu, którym określa się zespół warunków, od których jest uzależniony mechanizm transportu materiału

osadowego, typ powstających formy dna a konsekwencji typu warstwowania lub laminacji (wewnątrz-lawicowych struktur sedymentacyjnych). W odniesieniu do Liczby Freuda rozróżnia się dwa podstawowe typy reżimu przepływu:

Dolny reżim przepływu, charakteryzujący się następującymi cechami:

1. prąd jest spokojny ($Fr < 1$),
2. natężenie transportu materiału osadowego jest stosunkowo niskie,
3. na dnie koryta aluwialnego powstają formy dna w postaci – dna płaskiego, riplemarków i wydmy piaszczystych,
4. fale na powierzchni wody płynącej w korycie aluwialnym są przesunięte w fazie w stosunku do nierówności (undulacji) dna,
5. nie wszystkie ziarna budujące dno koryta aluwialnego są transportowane,
6. erozja i transport obejmuje ziarna znajdujące się na do-prądowych zboczach nierówności,
7. depozycja ziaren odbywa się na zboczach zaprądowych form dennych.

Górny reżim przepływu, który można scharakteryzować następująco:

1. prąd jest rwący ($Fr > 1$),
2. w korycie aluwialnym występuje duże natężenie przepływu,
3. opory przepływu są stosunkowo małe,
4. na dnie koryta aluwialnego powstają formy dna w postaci dna wyrównanego lub wydmy wstecznych,
5. fale na powierzchni wody płynącej w korycie aluwialnym są zgodne w fazie w fazie w stosunku do nierówności (undulacji) dna,
6. Transport materiału odbywa się na całej powierzchni dna koryta aluwialnego.

Zależność pomiędzy Liczbą Freuda a typem form dna powstających na dnie koryta aluwialnego przedstawia się następująco:

$0,00 < Fr < 0,15$	płaskie dno bez ruchu osadu
$0,15 < Fr < 0,30$	riplemarki
$0,30 < Fr < 0,60$	wydmy podwodne
$0,60 < Fr < 1,00$	formy przejściowe
$1,00 < Fr < 1,30$	płaskie dno z przesłoną trakcyjną
$Fr < 1,30$	wydmy wsteczne

KRYTERIA PODOBIENSTWA

Omawiany model kanału aluwialnego jest modelem fizycznym, wykonanym w skali zmniejszonej. Wyniki badań przeprowadzonych na modelu można porównywać z wynikami badań wykonanych w korytach naturalnych pod warunkiem, że zjawiska fizyczne zachodzące w modelu i jego pierwowzorze będą do siebie podobne geometrycznie, kinematycznie i dynamicznie. Dlatego też w badaniach modelowych oblicza się specjalne parametry określające wymienione wyżej kryteria podobieństwa.

Kryterium podobieństwa geometrycznego

Zjawiska zachodzące w modelu i jego pierwowzorze są geometrycznie podobne, jeśli współczynniki określające stosunki określonych długości w modelu i jego pierwowzorze będą takie same.

Przykładem takiego kryterium może być współczynnik kształtu riplemarków, który jest stosunkiem długości (rozstępu) riplemarka do jego wysokości (amplitudy)

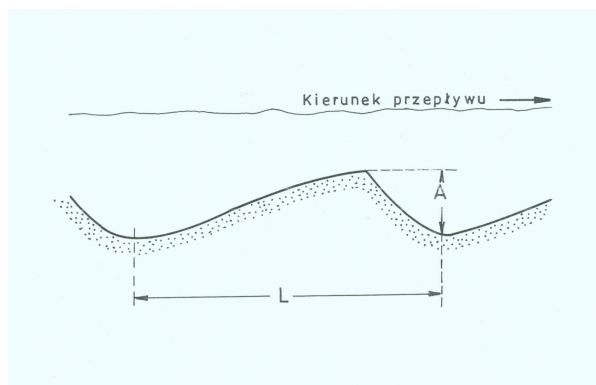


Fig. 7. Schematyczny przekrój przez riplemarka

Riplemarki modelowane w laboratorium mają rozmiary niewielkie (rozstęp i amplituda rzędu kilku centymetrów), podczas gdy w naturalnych rzekach bądź prądach morskich rozmiary riplemarków są znacznie większe (rozstęp i amplituda rzędu kilku decymetrów lub metrów), a więc tych form dna nie można ze sobą porównać bezpośrednio. Jednakże, jeśli w obu rozważanych przypadkach współczynnik kształtu W_k jest taki sam to, mimo, iż formy te mają inne rozmiary, to są one do siebie geometrycznie podobne.

Kryterium podobieństwa kinematycznego

Przepływy w modelu koryta aluwialnego i jego pierwowzorach są kinematycznie podobne, jeśli układ linii prądu w modelu i jego pierwowzorach będzie identyczny. Warunek taki jest spełniony wtedy, gdy stosunki prędkości i przyspieszenia przepływu w modelu i jego pierwowzorze są w każdym punkcie strumienia takie same (przy zachowaniu stosownej skali geometrycznej). Przykładem kryterium podobieństwa kinematycznego może być współczynnik V_{sr} / V_{kr} , gdzie V_{sr} jest średnią prędkością przepływu, a V_{kr} jest krytyczną prędkością przepływu, przy której rozpoczyna się ruch ziaren budujących dno koryta, których średnice w modelu i pierwowzorze mogą być inne. Jednakże, jednakowa wartość tego współczynnika obliczona dla modelu i jego pierwowzoru pozwala założyć, że prędkości przepływu w modelu i jego pierwowzorze są kinematycznie podobne.

Kryterium podobieństwa dynamicznego

Procesy przepływu mieszaniny wody i materiału osadowego w modelu i jego pierwowzorze są dynamicznie podobne, gdy stosunki określonych sił występujących w danym punkcie modelu i pierwowzoru będą takie same (przy zachowanym kryterium podobieństwa geometrycznego). Do najważniejszych sił występujących w trakcie przepływu w korytach aluwialnych należą siły bezwładności, siły lepkości oraz siły grawitacji. Przykładami bezwymiarowych współczynników określających podobieństwo dynamiczne są: Liczba Reynolds'a, oraz Liczba Freude'a.

HISTORIA EKSPERYMENTALNYCH BADAŃ MODELOWYCH WYKONYWANYCH W LABORATORIUM SEDYMENTOLOGICZNYM

Laboratoryjne badania struktur sedymentacyjnych mają w AGH tradycję ponad trzydziestoletnią. Dzięki inicjatywie profesora Janusza Kotlarczyka, z początkiem lat siedemdziesiątych dr Krzysztof Pasierbiewicz zaprojektował prototyp modelu koryta aluwialnego, którego wykonanie nadzorował wraz z mgr Janem Kępińskim. W wyniku tych prac, od roku 1973, w Zakładzie Geologii Ogólnej i Matematycznej Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH powstało i działa jedyne w Polsce Laboratorium Sedymentologiczne, w którym w kontrolowanych warunkach hydrodynamicznych prowadzone są ilościowe badania modelowe nad genezą i mechanizmem tworzenia się prądowych struktur sedymentacyjnych.

Pomysł uruchomienia Laboratorium początkowo związany był z zamiarem przeprowadzenia serii badań modelowych mających na celu wyjaśnienie mechanizmów powstawania struktur sedymentacyjnych występujących w diatomitach karpaczych. Po wykonaniu prototypowego modelu fizycznego koryta aluwialnego zespół badawczy rozpoczął prace kompleksowe nad genezą i mechanizmem tworzenia się tych struktur.

Pierwsze badania wykonane w laboratorium były ukierunkowane na zbadanie związku pomiędzy typem struktury sedymentacyjnej a charakterystyką hydrodynamiczną środowiska sedymentacji, w którym ta struktura powstała. W kontrolowanych warunkach laboratoryjnych udało się zreprodukować liczne struktury sedymentacyjne (zarówno powierzchniowe jak i wewnątrz-ławicowe) o cechach geometrycznych i granulometrycznych bardzo podobnych do struktur występujących w środowisku naturalnym. Co więcej, analiza porównawcza struktur sedymentacyjnych odtworzonych w laboratorium z ich naturalnymi odpowiednikami (przy zachowaniu kryteriów podobieństwa) pozwoliła na przetransponowanie wyników uzyskanych w laboratorium na struktury kopalne, co z kolei umożliwiło określenie ilościowej charakterystyki hydrodynamicznej paleoprądów, które wytworzyły poszczególne typy struktur sedymentacyjnych.

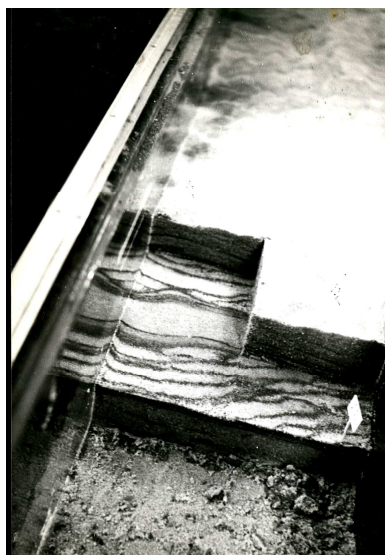


Fig. 8. Wewnątrz-ławicowe struktury sedymentacyjne odtworzone w Laboratorium Sedymentologicznym AGH

W tym okresie badania w Laboratorium Sedymentologicznym poświęcone były głównie problematyce genezy i mechanizmu powstawania riplemarków prądowych, oraz laminacji równoległej, przekątnej, falistej i smużystej. W badaniach tych czynnie uczestniczyli studenci indywidualnego toku studiów, oraz członkowie Sekcji Sedy-

mentologicznej studenckiego Koła Naukowego. Wyniki tych badań zostały opublikowane na „liście filadelfijskiej” (K.W. Pasierbiewicz, 1982)

W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia profil prac eksperymentalnych wykonanych w Laboratorium Sedymentologicznym został ukierunkowany na badania mechanizmu sedymentacji osadów drobno-ziarnistych laminowanych równolegle (tzw. laminitów) powstających w wyniku depozycji materiału osadowego z przepływających ponad podłożem sedymentacyjnym wodnych zawiesin pyłowo-ilastych. Taki profil badań wynikał z potrzeby wyjaśnienia genezy karpackich laminitów diatomitowych. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na wyjaśnienie genezy i mechanizmu tworzenia się laminitów karpackich, a ich wyniki zostały opublikowane renomowanym amerykańskim żurnalu naukowym „Journal of Sedimentary Research” (K.W. Pasierbiewicz i J.Kotlarczyk, 1997).

W ostatnim dziesięcioleciu Laboratorium Sedymentologiczne zostało gruntownie zmodernizowane pod nadzorem dr Wojciecha Masteja i mgr Jana Kępińskiego. Zmianie uległa również tematyka badawcza, która została tym razem ukierunkowana na badania eksperymentalne nad sedymentacją osadów mułowo – solnych.



Fig. 15 Struktury solne uzyskane w trakcie modelowania (fot. W. Mastej)

Laboratorium Sedymentologiczne przeniesiono do nowego pomieszczenia, a jego wyposażenie zostało gruntownie zmodernizowane celem dostosowania jego aparatury pomiarowej do standardów światowych.

Najważniejszym elementem modernizacji było zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie prototypowego miernika izotopowego wykonanego w ramach współpracy z Wydziałem Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, służącego do bezinwazyjnego, ciągłego pomiaru prędkości przepływu cieczy oraz koncentracji zawiesiny ilastej przepływającej w korycie doświadczalnym, przy wykorzystaniu promieniowania γ . Zastosowanie tego miernika uprościło w znacznym stopniu procedurę badawczą. Uprzednio pomiar koncentracji materiału osadowego w zawieszynie był bardzo pracochłonny i czasochłonny. Konieczne było, bowiem wielokrotne pobieranie próbek zawiesiny a następnie ich odfiltrowanie, odwirowanie, wysuszenie, a w końcu zważenie pozostałego osadu z dużą dokładnością. Chcąc uzyskać odpowiednią dokładność pomiaru próbki musiały być pobierane w krótkich odstępach czasu, co znacząco zwiększało liczebność pobieranych prób. W przypadku zastosowania w laboratorium nowego miernika izotopowego, możliwy jest pomiar „on line” prędkości przepływu oraz koncentracji materiału osadowego w przepływającej strudze, co znacznie ułatwia i przyspiesza pomiar oraz obróbkę danych, którą wykonuje (przelicza) specjalny program komputerowy. Układ dwóch źródeł izotopowych, umożliwia śledzenie nawet niewielkich fluktuacji koncentracji zawiesiny na krótkim odcinku, co umożliwia prawie natychmiastowy pomiar na określonej głębokości oraz śledzenie zmian mierzonego parametru w czasie.

Owocem badań wykonanych do tej pory w Laboratorium Sedymentologicznym jest kilkadziesiąt publikacji naukowych. W laboratorium tym wykonywano badania modelowe w ramach prac magisterskich i doktorskich. Od wielu lat w laboratorium

prowadzone są też programowe zajęcia dydaktyczne (laboratoryjne) dla studentów Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska.

PROCESY MODELOWE DEMONSTROWANE W LABORATORIUM SEDYMENTOLOGICZNYM

Celem ćwiczeń programowych w odbywanych przez studentów w Laboratorium Sedymantologicznym jest między innymi zademonstrowanie mechanizmu powstawania laminacji przekątnej. Studenci mogą nie tylko obserwować przebieg modelowanego procesu, lecz również dokonywać pomiarów stosownych danych służących do obliczania odpowiednich parametrów charakteryzujących modelowany proces.

Ćwiczenie rozpoczyna się od wyrównania dna koryta doświadczalnego, które pokryte jest piaskiem kwarcowym. Następnie zasuwa końcówką ustaloną określoną głębokość przepływu strugi cieczy korycie doświadczalnym i uruchamiamy (włączając pompę) przepływ o odpowiednim natężeniu. W wyniku tego, w korycie doświadczalnym odbywa się ustalony, jednokierunkowy przepływ cieczy.

Nad częścią wlotową koryta doświadczalnego umieszczone jest urządzenie zasilające strugę cieczy przepływającej w korycie materiałem osadowym (1). W tym przypadku zasilającym materiałem osadowym piasek kwarcowy, taki sam jaki znajduje się w korycie doświadczalnym.

Sypiący się piasek formuje na dnie koryta doświadczalnego pryzmę wzrastającą stopniowo ku górze, patrz Fig. 9. Faza I.

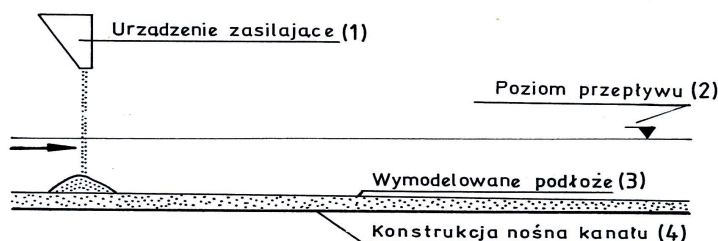


Fig. 9. Faza I

Pryzma ta wzrasta konsekwentnie do momentu wystąpienia nad jej grzbietem, krytycznej wartości głębokości przepływu (h_{kr}), przy której rozpoczyna się transport materiału osadowego znajdującego się na grzbiecie pryzmy, patrz Fig. 10. Faza II. Dzieje się tak, dlatego, że wzrastanie pryzmy powoduje konsekwentne zmniejszanie się pola przekroju przepływającej nad nią strugi cieczy, co z kolei powoduje wzrost prędkości przepływu nad grzbietem pryzmy, a w konsekwencji wzrost siły strumienia. W warunkach wystąpienia krytycznej głębokości przepływu (h_{kr}) nad grzbietem pryzmy, pryzma przestaje rosnąć, ponieważ materiał ziarnisty znajdujący się na jej grzbiecie zostaje uruchomiony przez strugę cieczy (rozpoczyna się transport). Ziarna piasku są „zbierane” z grzbietu pryzmy przez przepływ i gromadzone na skłonie za-prądowym pryzmy, po czym zaczynają się po tym stoku grawitacyjnie osypywać.

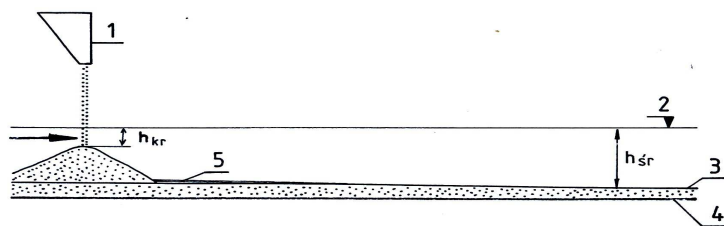


Fig. 10. Faza II

Studenci mogą zaobserwować, że osypywanie się pisaku po stoku za-prądowym przyzmy odbywa się lawinowo i okresowo. Materiał piaszczysty gromadzi się przy grzbiecie przyzmy do momentu przekroczenia granicznej wartości kąta tarcia wewnętrznego, kiedy to materiał ten zaczyna się osypywać lawinowo po stoku za-prądowym przyzmy tworząc laminę piaszczystą „przekątną”, czyli nachyloną pod pewnym kątem do podłoża sedimentacyjnego (w tym przypadku piaszczystego dna koryta doświadczalnego). Cykliczne osuwanie się kolejnych lawin materiału osadowego po stoku za-prądowym przyzmy powoduje powstawanie kolejnych lamin warstwowania przekątnego, oraz poziomy przyrost przyzmy w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu w korycie doświadczalnym, patrz Fig. 11. Faza III. Z sedimentologicznego punktu widzenia, grupa lamin budująca przyrastającą w poziomie przyzmę tworzy pojedynczy zestaw warstwowania przekątnego.

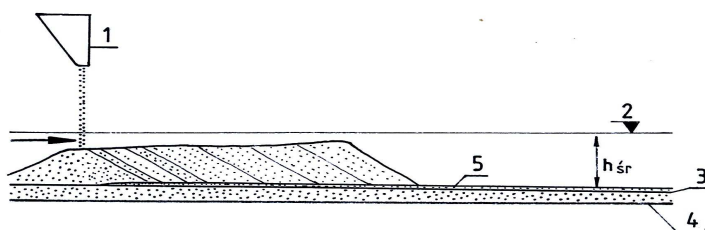


Fig. 11. Faza III

Następnym etapem ćwiczenia (patrz Fig. 12. Faza IV) jest zwiększenie głębokości przepływu w korycie doświadczalnym w wyniku podniesienia na określoną wysokość zasuwy końcowej koryta. W takiej sytuacji przyrost horyzontalny przyzmy zostaje zatrzymany, ponieważ wzrost głębokości przepływu nad przyzmą powoduje obniżenie się siły strumienia, co skutkuje zatrzymaniem zjawiska transportu materiału osadowego.

Na uprzednio powstałej przyzmie zaczyna się usypywać nowy stożek materiału osadowego wzrastający ku górze aż do momentu wystąpienia ponownie nad jego grzbietem krytycznej głębokości przepływu, przy której zostaje ponownie uruchomiony ruch ziaren materiału osadowego budującego nową przyzmę.

W efekcie rozpoczyna się przyrost horyzontalny nowej przyzmy, która pokrywa (grzebie) przyzmę powstałą uprzednio. Przyrost horyzontalny nowej przyzmy skutkuje powstaniem nowego zestawu laminacji przekątnych, który osadza się na zestawie laminacji przekątnych powstałym uprzednio (w fazie III-ciej). W tym momencie mamy do czynienia z powstaniem dwu zestawów warstwowania przekątnego, które razem tworzą wielo-zestaw warstwowania przekątnego.

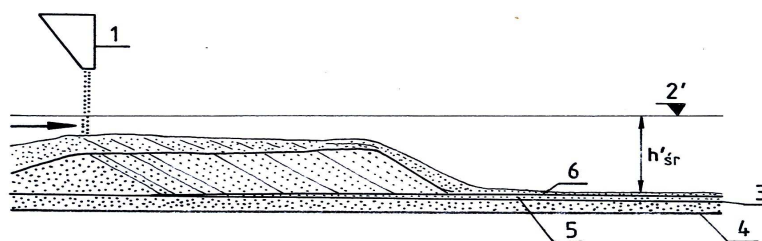


Fig. 12. Faza IV

Jak wykazano, w trakcie wykonanego doświadczenia powstały dwa zestawy warstwowania przekątnego, które razem wzięte tworzą tzw. wielo-zestaw warstwowania przekątnego.

Wykonane doświadczenie dowodzi, że warstwowanie przekątne powstaje zawsze w dynamicznym środowisku sedymentacji (w tym przypadku przepływ wody transportującej materiał osadowy), a typ tworzących się struktur warstwowania przekątnego jest wynikiem zmian charakterystyki hydrodynamicznej środowiska sedymentacji (w tym przypadku zmian głębokości przepływu). Wielo-zestawy warstwowania przekątnego powstają w tym przypadku w wyniku wzajemnego wspinania się na siebie oddzielnych form dna.

Z hydraulicznego punktu widzenia, w przepływie powodującym rozwój i horyzontalny przyrost modelowanej pryzmy można wyróżnić trzy strefy o odmiennej charakterystyce hydrodynamicznej. Są to kolejno: strefa strumienia, strefa wpływu oraz strefa wody zgłębionej.

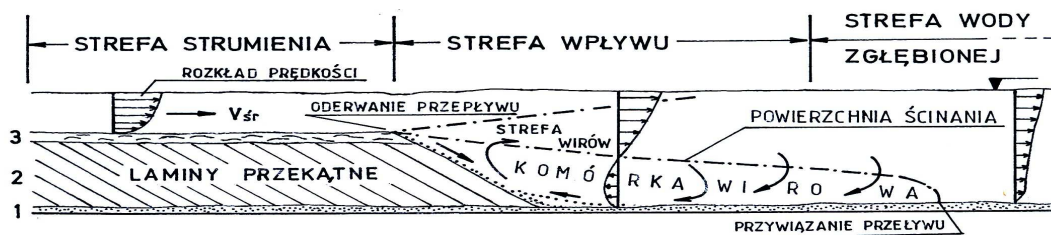


Fig. 13. Schemat charakterystyki hydrodynamicznej modelowanego środowiska sedymentacji

Przepływ w strefie strumienia można traktować jako przepływ zrównoważony, a grzbiet pryzmy można w tym przypadku traktować jako dno przepływającego nad strumienia cieczy.

Strumień cieczy przepływający w strefie strumienia po minięciu krawędzi modelowanej pryzmy wpływa do ośrodka wodnego o znacznie większej głębokości zwanego strefą wpływu strumienia. Przy krawędzi pryzmy następuje zjawisko oderwania strumienia od powierzchni pryzmy, a oderwany strumień w pewnym punkcie ponownie się przyłącza do podłoża sedymentacyjnego. Na podstawie obserwacji banieczek powietrza, w obrębie strefy wpływu studenci mogą zaobserwować dwie mniejsze strefy, a mianowicie strefę intensywnych wirów i tzw. komórkę wirową (patrz rysunek niżej). Komórka wirowa stanowi duży walcowaty wir o osi prostopadłej do kierunku

przepływu cieczy, rozwijający się na przedpolu pryzmy. Jak widać z układu wektorów prędkości wirowej, w dolnej części komórki wirowej ciecz płynie w kierunku przeciwnym do ogólnego kierunku przepływu w korycie doświadczalnym, transportując materiał osadowy niejako „pod prąd” w kierunku stopy pryzmy.

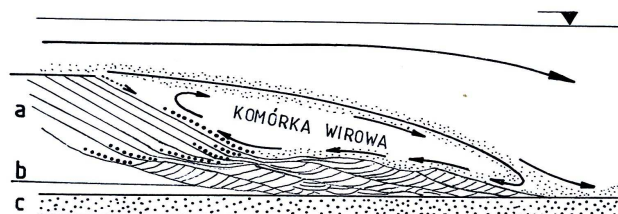
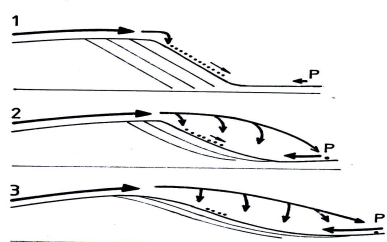


Fig. 14. Komórka wirowa

Zjawisko to jest istotne w sedimentologii, gdyż od niego zależy charakter geometryczny kontaktu lamin przekątnych pryzmy z podłożem sedimentacyjnym, który może być kątowy (ostry), tangencjalny (styczny) czy sigmoidalny - patrz poniższy schemat:



Kontakt kątowy

Kontakt tangencjalny

Kontakt sigmoidalny

Fig. 15. Rodzaje kontaktu lamin przekątnych z podłożem sedimentacyjnym

W Laboratorium Sedymetologicznym można też obserwować zjawisko hydraulicznego sortowania materiału osadowego oraz różne rodzaje transportu ziaren materiału osadowego w korycie aluwialnym. W zależności od frakcji materiału osadowego można zaobserwować trzy rodzaje transportu:

1 – transport ziarn w zawieszynie zwany transportem suspensyjnym (ziarna o frakcjach najdrobniejszych). W przypadku transportu suspensyjnego ziarna materiału osadowego nie kontaktują się z dnem, 2 – saltacyjny transport ziaren (ziarna drobno i średnio-ziarniste. W tym przypadku kontakt ziaren materiału osadowego jest przerywany, a ziarna wykonują skoki odbijając się od dna koryta doświadczalnego; oraz 3 - transport ziaren przez wleczenie po dnie (transport wleczony lub trakcyjny). W tym przypadku transportowane ziarna wykazują ciągły kontakt z dnem koryta.

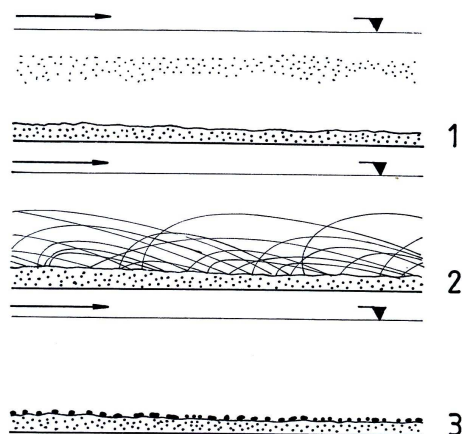


Fig. 16. Rodzaje transportu materiału osadowego (1-transport suspensyjny; 2-transport saltacyjny; 3-transport wleczony)

Materiał transportowany hydraulicznie tworzy w zależności od prędkości i energii przepływu różne rodzaje form dna. Obserwacje terenowe i badania modelowe pozwalają na określenie dwóch zespołów warunków hydrodynamicznych, od których uzależnione są: mechanizm transportu i występowanie struktur sedymentacyjnych osadu. Zespoły te określa się jako dolny i górny reżim przepływu.

Opisywane laboratorium, stanowiące model koryta aluwialnego (rzeki) jest wykorzystywane do następujących zadań:

Badania sedymentologiczne

- Badanie formy przestrzennej struktury sedymentacyjnej (wymiary, kształt, proporcje) w odniesieniu do charakterystyki hydrodynamicznej przepływu.
- Badanie związku pomiędzy budową wewnętrzną struktur sedymentacyjnych (np. typ warstwowania lub laminacji) a ich formą geometryczną (np. typ formy dna).
- Badanie zależności pomiędzy fizycznymi własnościami materiału osadowego (kształt i wielkość ziaren, stopień jednorodności materiału ziarnistego) a hydrodynamicznymi parametrami charakteryzującymi rodzaj przepływu.
- Określanie mechanizmu i siły transportu materiału osadowego w zależności od hydrodynamiki przepływu
- badanie zależności pomiędzy morfologią struktur depozycyjnych a ich budową wewnętrzną,
- badanie mechanizmu osadzania cząstek materiału osadowego w wodzie,
- badanie orientacji przestrzennej ziaren materiału osadowego w zależności od charakteru przepływu itp.

Badania hydrauliczne

- Badanie wpływu hydrodynamiki przepływu na powstawanie określonych struktur sedymentacyjnych, zarówno powierzchniowych (np. typ formy dna) jak i wewnętrzno-warstwowych (np. typ warstwowania lub laminacji)
- Określenie limitów hydraulicznych warunkujących powstawanie poszczególnych struktur sedymentacyjnych

Dolny reżim przepływu.

W warunkach dolnego reżimu przepływu natężenie transportu jest małe, a opory przepływu duże. Formami występującymi na dnie są: płaskie dno bez ruchu ziarn, małe i duże riplemarki, fale piaskowe. Po zaprądowych wypukłych formach występują komórki wirowe.

- małe riplemarki powstają z materiału o drobnym ziarnie, mają łagodnie nachylone zbocza podprądowe i strome zbocza zaprądowe (kąt zsypu naturalnego, ok. 30°). Ich wysokość waha się od kilku milimetrów do kilku centymetrów. Materiał jest w tym przypadku transportowany trakcyjnie.
- duże riplemarki są stosunkowo dużymi formami, o grzbietach bardziej regularnych, krętych lub mających kształt półksiężyców. Wysokość riplemarków ma rząd wielkości decymetrów. Stok doprądowy jest łagodny, niejednokrotnie może być pokryty małymi riplemarkami. Stok zaprądowy jest stromy i ma charakter stoku osypiskowego.
- Podwodne fale piaszczyste to formy duże, asymetryczne, o prostym lub falistym grzbiecie. W tym przypadku wysokość form dna może dochodzić do 2 m, a długość do dziesiątek metrów.

Górny reżim przepływu.

Jest to przepływ, w którym natężenie przepływu jest duże, a opory przepływu małe. Formami dna występującymi w górnym reżimie przepływu są: dno zrównane (tzw. górnego reżimu przepływu), oraz podwodne wydmy wsteczne. Morfologia form dna jest zgodna w fazie z morfologią (pofalowaniem) powierzchni wody.

Vide rys 6:

1,2,3,4 – Dolny reżim przepływu

(1 - płaskie dno - dolnego reżimu przepływu; 2 - małe riplemarki; 3,4 – duże riplemarki),

5,6,7 – Górny reżim przepływu

(5 - płaskie dno – górnego reżimu przepływu; 6,7 - wydmy wsteczne)



SŁOWNICZEK WYBRANYCH TERMINÓW

Antydiuna – nagromadzenie piasku w formie wału ustawionego poprzecznie do kierunku prądu, o asymetrycznym przekroju poprzecznym. Powstaje w warunkach górnego reżimu przepływu.

Basen sedymentacyjny – przestrzeń, w której zachodzą procesy depozycji osadów,

Ciężar objętościowy – stosunek masy dowolnie wyodrębnionej bryły do jej objętości,

Dno zrównane (płaskie dno) – forma dna, nie wykazująca nierówności przekraczającej wartość kilku średnic materiału osadowego,

Dolny reżim przepływu – przepływ, w którym natężenie transportu jest małe, a opory przepływu duże. Na dnie koryta powstają riplemarki lub wydmy pokryte riplemarkami,

Gęstość cieczy – stosunek masy danej cieczy do jej objętości,

Górny reżim przepływu – przepływ, w którym natężenie transportu jest duże, a opory przepływu małe. Na dnie koryta aluwialnego powstają tekie formy jak: dno zrównane z przesłoną trakcyjną, fale stojące lub wydmy wsteczne,

Jednostka sedymentacyjna – struktura powstała w określonych warunkach hydrodynamicznych środowiska sedymentacyjnego,

Kąt zsypu naturalnego – kąt nachylenia stoku powstający przy grawitacyjnym osypywaniu się materiału luźnego osadowego,

Komórka wirowa – wir o osi poziomej skierowanej prostopadle do kierunku przepływu,

Koryto aluwialne – naturalny ciek wodny o dnie zbudowanym z luźnego materiału klastycznego,

Kryterium podobieństwa modelu i jego pierwowzoru – w trakcie badań ilościowych wykonywanych na modelu zmniejszonym, wyniki badań i pomiarów mogą być porównywalne z procesami zachodzącymi a przyrodzie na dużą skalę. Jeżeli model spełnia warunki umożliwiające zachowanie stałej skali zmniejszenia to takie warunki nazywamy kryterium podobieństwa modelu i jego pierwowzoru,

Lamina – najmniejsza warstwa dająca się wyróżnić w osadzie makroskopowo,

Lepkość – fizyczna cecha płynu polegająca na stawianiu oporu przy wzajemnym przesuwaniu się cząstek, zmniejsza się ona wraz ze wzrostem temperatury,

Lepkość dynamiczna - [gs/cm^2], (lepkość dynamiczna danej cieczy wynosi 1 Pas (1 Paskalosekunde), jeżeli siła potrzebna do przesunięcia warstwy cieczy o powierzchni 1 cm^2 względem drugiej takiej samej warstwy oddalonej o 1 cm, z prędkością 1 cm/sec wynosi 1 dynę).

Liczba Froude'a – w dynamice płynów wielkość bezwymiarowa charakteryzująca wielkość sił bezwładności względem sił ciężkości,

Liczba Reynoldsa – bezwymiarowy parametr określający przejście ruchu laminarnego w ruch burzliwy,

Linia prądu – jest to linia, która przechodzi przez chwilowe pole wektorów prędkości w taki sposób, że wektory prędkości poszczególnych punktów znajdujące się na tej linii są do niej styczne. Poszczególne linie prądu nie krzyżują się ze sobą,

Materiał osadowy – materiał klastyczny transportowany w korycie aluwialnym,

Materiał unoszony – materiał klastyczny transportowany przez przepływ turbulentny w zawiesinie (brak kontaktu z dnem),

Materiał wleczony – transportowany materiał osadowy mający ciągły kontakt z dnem,

Moc strumienia – tempo przekształcania energii potencjalnej w kinetyczną podczas ruchu. Część tej mocy jest używana na transport materiału wleczonego przez ślizgania, toczenie i saltację,

Natężenie przepływu – jest to objętość cieczy przepływającej przez przekrój w jednostce czasu,

Opór kształtu – opór przepływu związany z oderwaniem się strumienia od powierzchni ciała stałego, w korytach aluwialnych opór ten jest związany z występującymi na dnie formami,

Opór przepływu – jest sumą oporu wywołanego ziarnową szorstkością dna i oporu kształtu form dna, w korycie aluwialnym występują trzy rodzaje oporów przepływu, są to: opór lepkości, opór tarcia, opór kształtu. Są to siły przeciwdziałające ruchowi płynu w czasie, gdy płyn i stały materiał znajdują się w ruchu względem siebie. (Opory te charakteryzowane są przez parametry: współczynnik prędkości, współczynnik szorstkości, spadek oraz głębokość),

Opór tarcia – opór działający na powierzchniach stycznych do kierunku ruchu,

Płyn newtonowski - płyn, którego lepkość dynamiczna nie zależy od prędkości ruchu (np. woda, powietrze)

Płyn nienewtonowski – płyn, którego lepkość dynamiczna zależy od prędkości ruchu, np. roztwory koloidalne, układy dwufazowe składające się z wody i zawieszonych w niej cząstek stałych.

Podłoże sedymentacyjne – powierzchnia, na której osadza się materiał osadowy. Powierzchnie ta może mieć charakter depozycyjny lub erozyjny,

Podobieństwo dynamiczne – stosunki sił działających na odpowiadające sobie ciała (np. ziarna osadu i cząstki płynu) w modelu i pierwowzorze muszą być stałe,

Podobieństwo geometryczne – stosunki odpowiadających sobie wymiarów liniowych w modelu i w pierwowzorze (np. stosunek głębokości do szerokości koryta aluwialnego) muszą być stałe,

Podobieństwo kinematyczne – stosunki prędkości i przyspieszeń w modelu i jego pierwowzorze muszą być takie same.

Pole wektorów prędkości – płaszczyzna pionowego przekroju poruszającego się płynu, na której każdemu punktowi w określonym momencie przypisany jest wektor prędkości, wyrażający bezwzględną wartość prędkości i kierunek,

Powierzchnia graniczna – powierzchnia ograniczająca zbiór lamin przekątnych ułożonych w jednolitym porządku geometrycznym,

Prąd nieustalony – rodzaj ruchu płynu, w którym elementy ruchu w poszczególnych punktach przestrzeni są funkcjami położenia punktu i czasu,

Prąd powrotny – prąd w części komórki wirowej skierowany przeciwnie do ogólnego kierunku przepływu w korycie aluwialnym. Działalność prądu powrotnego powoduje powstawanie tangencjalnego (stycznego) kontaktu lamin z dnem

Prąd ustalony – rodzaj ruchu płynu, w którym elementy ruchu płynu w poszczególnych punktach zależą tylko od położenia punktu a nie są zmienne w czasie,

Próg ruchu – wielkość siły potrzebnej do uruchomienia ziarna przez przepływającą strugę cieczy,

Przepływ laminarny (uwarstwiony) – przepływ, w którym linie prądu są równoległe do siebie,

Przepływ turbulentny (burzliwy) - przepływ, w którym linie prądu poszczególnych cząstek cieczy wykazują względem siebie ruchy poprzeczne, ruch turbulentny jest zawsze ruchem nieustalonym i charakteryzuje się strukturą wirową,

Przepływ zrównoważony – przepływ w korycie aluwialnym w czasie, którego głębokość przepływu, spadek hydrauliczny oraz natężenie transportu materiału osadowego są stałe, a dno pokryte jest formami dna określonego typu,

Przesłona trakcyjna – występująca w górnym reżimie przepływu cienka warstwa gęstej mieszaniny woda – osad przemieszczająca się przy dnie koryta,

Riplemarki – formy dna o przekroju trójkątnym występujące na dnie koryta aluwialnego,

Riplemarki falowe – formy dna o trójkątnym, symetrycznym przekroju powstające w trakcie falowania,

Riplemarki prądowe – formy dna o charakterystycznym asymetrycznym (trójkątnym) przekroju poprzecznym, migrujące po dnie zgodnie z kierunkiem przepływu. Stoki doprądowe mają łagodnie nachylone i dłuższe, stoki zaprądowe krótkie, o kącie nachylenia zbliżonym do kąta zsypu naturalnego,

Rozszerzalność cieplna cieczy – zdolność do zmiany objętości pod wpływem zmiany temperatury,

Ruch jednostajny – ruch, w którym prędkości przepływu w odpowiadających sobie punktach przekrojów poprzecznych płynu są stałe, a powierzchnie przekrojów jednakowe,

Ruch niejednostajny – ruch, w którym prędkości i przekroje poprzeczne są zmienne w czasie,

Ruch nieustalony - ruch, w którym odpowiadające mu pole wektorów prędkości jest zmienne w czasie,

Ruch nieustalony – występuje, gdy odpowiadające mu pole wektorów prędkości jest zmienne w czasie,

Ruch ustalony – występuje, gdy odpowiadające mu pole wektorów prędkości nie zmienia się w czasie,

Sedymentologia – nauka o procesach fizycznych, chemicznych i biologicznych prowadzących do powstawania osadów,

Spad hydrauliczny – różnica poziomów linii energii w dwóch przekrojach położonych na początku i na końcu dowolnie przyjętego odcinka,

Spadek hydrauliczny – stosunek spadu hydraulicznego do długości odcinka,

Stała von Karmana - zawiera ona w sobie takie elementy przepływu jak: prędkość masową płynącej wody, $[m^3]$, głębokość, $[m]$, przekrój poprzeczny, $[m^2]$, współczynnik dyspersji, $[m^2/s]$, koncentrację osadu zawieszonego w przepływie, $[kg/m^3]$, efektywną grubość górnej warstwy osadu, związaną z tzw. masą prędkości sedymentacji i tworzenia zawiesiny,

Strefa wirów – część komórki wirowej charakteryzująca się wysoką turbulencją, występuje w niej duża ilość małych, nieregularnych zawirowań,

Struktura sedymentacyjna – przestrzenne ułożenie ziaren materiału osadowego powstałe w wyniku działalności określonego procesu sedymentacyjnego,

Struktura sedymentacyjna powierzchniowa – struktury powstałe na powierzchni warstw,

Struktura sedymentacyjna wewnątrz ławicowa – struktury widoczne w przekroju pionowym osadu,

Strumień płynu – obejmuje wszystkie pęki linii prądu przechodzące przez dowolnie wyodrębnione pole poprzeczne przepływającego płynu,

Środowisko sedymentacyjne – zespół cech basenu sedymentacyjnego,

Tor cząstki – linia, którą poruszająca się cząstka zakreśla w przestrzeni,

Transport hydrauliczny – przebiegający pod działaniem siły przepływającego płynu, kosztem energii kinetycznej,

Transport saltacyjny – transport, w którym transportowane ziarno ma okresowy kontakt z dnem,

Transport suspensyjny (zawiesinowy) – rodzaj transportu, w którym transportowane ziarna wykazują okresowy kontakt z dnem,

Transport trakcyjny – transport, w którym ziarno wykazuje stały kontakt z podłożem,

Twierdzenie Bernoulliego – „Przy ruchu ustalonym cieczy doskonałej, odbywającym się pod wpływem sił zachowawczych całkowita energia jednostki masy, stanowiąca sumę energii kinetycznej i energii potencjalnej, jest w każdym punkcie jednej i tej samej strugi stała”,

Warstwowanie przekątne – struktura sedymentacyjna charakteryzująca się warstwowaniem nachylonym pod kątem do podłoża sedymentacyjnego,

Warunki progowe ruchu ziaren – przepływ, który powoduje ruch poprzednio osadzonych ziaren materiału osadowego. Zapoczątkowanie ruchu ziaren zależy od średnicy ziaren, ciężaru właściwego ziaren zanurzonych w cieczy, ciężaru właściwego płynu, granicznego naprężenia ścinającego i od lepkości płynu, czyli są zależne od różnych czynników związanych zarówno z materiałem wyścielającym dno jak i z przepływem,

Wielozestaw – grupa zestawów złożonych, powstałych przy ustalonych warunkach przepływu w korycie aluwialnym,

Wskaźnik genetyczny – zespoły cech osadów umożliwiające interpretację charakterystyki środowiska sedymentacyjnego oraz zachodzące w tym środowisku procesów sedymentologicznych,

Współczynniki oporu przepływu – bezwymiarowe parametry liczbowe określające wielkość oporu przepływu w korycie aluwialnym,

Wydmy – formy dna analogiczne jak riplemarki prądowe, lecz charakteryzujące się większymi rozmiarami,
Wydmy wsteczne – formy denne o cechach zbliżonych do wydym, lecz migrujące po dnie koryta aluwialnego w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu w korycie aluwialnym,
Zestaw prosty – grupa sąsiadujących ze sobą lamin ułożonych w jednolitym porządku geometrycznym,
Zestaw złożony – grupa zestawów prostych, występująca w obrębie jednej jednostki sedymentacyjnej powstająca w ustalonych warunkach przepływu w wyniku lokalnego zróżnicowania warunków hydrodynamicznych,
Zmienna niezależna – zespół warunków wynikający z nałożenie na system modelowy określonych wartości zmiennych zależnych,
Zmienna zależna – warunek, jaki badacz nakłada na system modelowy,

LITERATURA

- Allen, J.R.L., 1977**, Fizyczne Procesy Sedymentacji: Biblioteka problemów. Warszawa
- Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R., 1986**, Zarys sedymentologii. Wydawnictwa geologiczne, Warszawa, 1986.
- Pasierbiewicz, K.W., 1975**, Laboratorium do modelowych badań sedymentologicznych (Laboratory equipment for sedimentary experiments): Zeszyty Naukowe AGH, Geologia, v.1, p. 49-60.
- Pasierbiewicz, K.W., 1976**, Prądowe formy depozycyjne występujące na dnie koryt aluwialnych w świetle badań laboratoryjnych (Alluvial bed forms in the light of flume experiments): Postępy Nauk Geologicznych, v.7, p. 7-49.
- Pasierbiewicz, K.W., 1977**, Laboratoryjne modelowanie niektórych typów warstwowań przekątnych (Laboratory modelling of some types of cross-bedded units): Spraw. Pos. Kom. Nauk PAN, v. 21, p. 113-116.
- Pasierbiewicz, K.W., 1981**, Systematyka jednostek warstwowania przekątnego (Genetic classification of cross-bedding): Zesz. Nauk. AGH, Geologia, v. 7, p. 40-57.

- Pasierbiewicz, K.W. , Kępiński J., 2004**, Badania laboratoryjne jako przyczynek do wyjaśnienia mechanizmu sedimentacji karpackich laminatów diatomitowych (Aids to the explanation of sedimentation mechanism of the Carpathian diatomaceous laminites – a laboratory study): *Geologia: Kwartalnik Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie*, t. 30 z. 1, s. 67-84.
- Petryka L., Zych M., Mastej W., Kępiński J., Rzepa G., 2005**, Analiza przepływu zawiesin okrzemkowo-iłowych w laboratoryjnym kanale otwartym (Flume study on diatomaceous-clayey suspensions). *Materiały Krajowego Sympozjum "Technika jądrowa w przemyśle, medycynie, rolnictwie i ochronie Środowiska, Kraków 7-9 września 2005"*.
- Bukowski K., Mastej W., Kępiński J., 2005**, Badania laboratoryjne nad sedimentacją osadów mułowo-solnych w zależności od warunków przepływu i charakteru materiału sedimentacyjnego (Laboratory studies on deposition of salty-mud sediments controlled by flow regime and sediment characteristic). *Technika Poszukiwań Geologicznych : Geosynoptyka i Geotermia*. 44 z. 234–235 nr 4–5, s. 69–76.
- Bukowski K., Mastej W., Kępiński J., 2007**, Badania laboratoryjne nad sedimentacją redeponowanych osadów mułowo-solnych na stożku podmorskim (Laboratory studies of redeposition of mud-salt deposits in the submarine fan environment). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi = Mineral Resources Management*. Polska Akademia Nauk ; ISSN 0860-0953. t. 23 z. spec. 1, s. 175–182.