

14. Granularny rozbryzg

Drużyna XIV LO im. Stanisława Staszica w Warszawie

1. Wstęp.

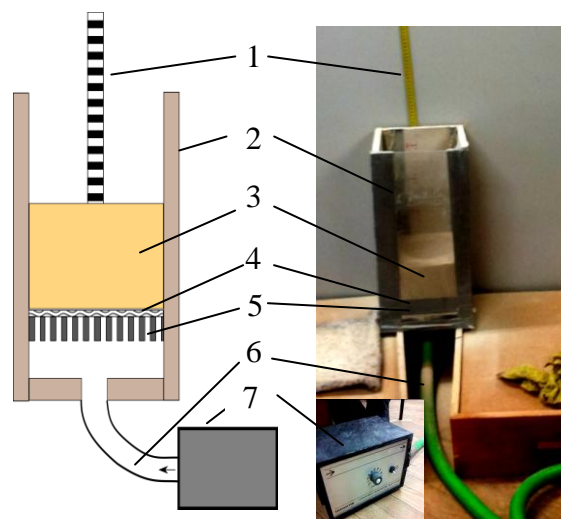
Każdy z nas rzucał kiedyś kamieniem do stawu obserwując powstającą pionową kolumnę wody oraz rozchodzenie się fal po powierzchni, a niektórzy oglądali kratery powstałe po uderzeniu meteorytów lub te znajdujące się na Księżycu. Okazuje się, że zjawiska te mają wspólne wyjaśnienie fizyczne. Dobrze wszystkim znane zjawisko powstania rozbryzgu oraz kolumny wody po wrzuceniu do niej kamienia można przyrównać do ciała uderzającego w piasek. Stalowa kulka wrzucona w luźny, drobny i suchy piasek powoduje rozbryzg, po którym może nastąpić wyrzucenie pionowej kolumny, pomimo, iż w piasku nie istnieje napięcie powierzchniowe.

Zainteresowanie tym zjawiskiem nastąpiło w 2001 roku, po opublikowaniu pracy Sigurdura Thoroddsen'a i Amy Shen z amerykańskiego Uniwersytetu Illinois, którzy opisali ten fenomen. Od tamtej pory badanie go jest tematem licznych prac naukowych.

W niniejszym opracowaniu został przedstawiony opis stworzonego przez nas układu, który pozwala na odtworzenie tego zjawiska, obserwacje, jakich dokonaliśmy oraz dyskusja istotnych czynników, mających wpływ na jego przebieg. Zaprezentowaliśmy również opis jakościowy doświadczenia. Następnie przedstawiamy wyniki naszych pomiarów. W ostatniej części umieszczone są wnioski oraz perspektywy dalszej pracy nad zadaniem.

2.1. Układ doświadczalny.

W celu odtworzenia eksperymentu, dokonania obserwacji oraz wykonania pomiarów zbudowaliśmy układ doświadczalny, przedstawiony na rycinie nr 1. Pojemnik był dostatecznie szeroki w porównaniu do średnicy kulki, więc wpływ ścianek bocznych na przebieg eksperymentu można pominąć. Doświadczenia były rejestrowane za pomocą kamery umieszczonej na statywie obok układu.



Ryc.1. 1-miarka 2-pojemnik 3-piasek 4- materiał zapobiegający przelatywaniu ziaren piasku 5- płyta z otworami 6-rura wprowadzająca powietrze 7- pompa powietrza.

2.2. Metodyka doświadczeń.

Doświadczenia zostały wykonane wg następującej procedury:

- 1) napowietrzanie piasku poprzez włączenie pompy powietrza oraz powolne jej wyłączenie.
- 2) zrzucanie kulki w piasek i rejestrowanie zjawiska za pomocą kamery.

Do odtworzenia zjawiska użyliśmy drobno zmielonego piasku kwarcowego (wielkość ziaren od $50\mu\text{m}$ do $80\mu\text{m}$) umieszczonego w pojemniku o wymiarach $17,5\text{cm} \times 17,5\text{cm} \times 45\text{cm}$, do którego zrzucaliśmy stalową kulkę o promieniu $1,52\text{cm}$.

3. Obserwacje.

Piasek, przez który przepuściliśmy powietrze pod ciśnieniem, stał się luźno upakowany. Wrzucenie weń kulki spowodowało powstanie rozbryzgu, a następnie w górę została wyrzucona kolumna piasku (ryc. 2). Dokonując obserwacji zmienialiśmy różne parametry, tj. wielkość ziarenek piasku, rozmiar pudełka, objętościowy udział powietrza, rozmiar i gęstość kulek, wysokość zrzutu, wysokość piasku w pudełku. Doświadczenia wykonywaliśmy przy zmiennych warunkach atmosferycznych, z których najważniejszym elementem wpływającym na doświadczenie była

wilgotność powietrza, która istotnie wpływała na wilgotność piasku. Poniżej przedstawiamy nasze obserwacje:

Wielkość ziarenek piasku.

Wielkość ziarenek piasku wpływa na doświadczenie. Nie było możliwe wprowadzenie warstwy piasku w stan fazy fluidalnej* ziaren o rozmiarach powyżej 1,0 mm, co implikowało niemożność zagłębienia się kulki w piasku oraz utworzenia pionowej kolumny. W takim przypadku następował jedynie rozbryzg. Regulowaliśmy średnicę ziarenek piasku, mieląc je oraz przesiewając przez sita. Odnotowaliśmy, że wraz ze zmniejszaniem się ziarenek, materia jest lepiej napowietrzana i wprowadzona w stan fluidalny oraz kulka zagłębia się swobodniej powodując powstanie pionowej kolumny piasku.

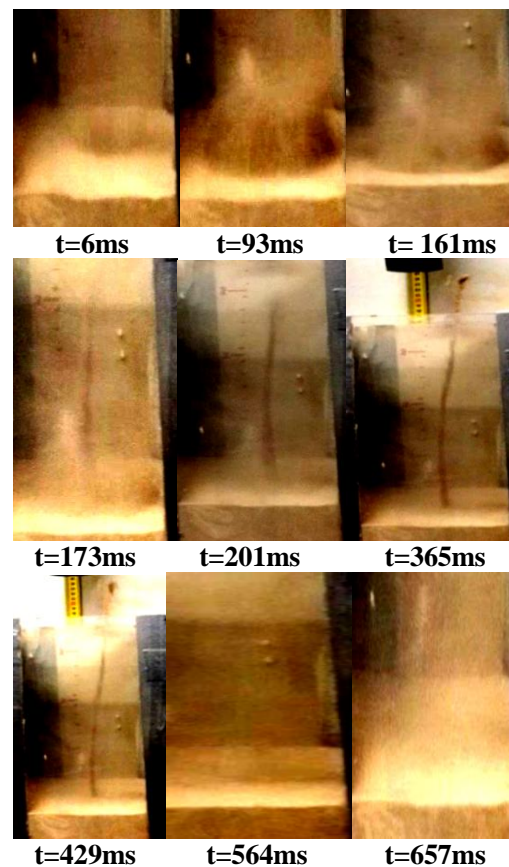
Wymiary pudełka.

Wielkość poziomego pola przekroju jest ważnym czynnikiem wpływającym na wysokość strumienia piasku. Pomimo braku bezpośrednich oddziaływań pomiędzy kulką i wchodzącą z nią w kontakt materią granularną a ściankami pojemnika, objętość piasku działającego siłą skierowaną od ścianek naczynia w kierunku środka, odgrywa istotną rolę. Zmniejszając pole przekroju poziomego pudełka, zaobserwowaliśmy, że wysokość i średnica powstałej pionowej kolumny piasku maleje. Uznaliśmy, że jest to spowodowane mniejszą masą pokładów piasku biorących udział podczas zapadania jaskini po penetrującej kulce. Tym samym, kiedy pod wpływem grawitacji piasek się zapada, powstaje mniejszy skok ciśnienia i powstałe strumienie mają mniejsze rozmiary. Zaobserwowaliśmy również, że zwiększenie wysokości piasku w naczyniu odgrywa znikomą rolę powyżej wysokości granicznej równej 12 cm.

Rozmiar kulki.

Rozmiar kulki wpływa na wielkość powstałego krateru, wielkość rozbryzgu oraz na wysokość i średnicę pionowej kolumny piasku. Zwiększając średnicę kulki zauważyliśmy powstawanie

większego rozbryzgu oraz wyższej i „grubszej” pionowej kolumny.



Ryc. 2. Zdjęcia przedstawiają kolejne etapy przeprowadzonego przez nas doświadczenia następujące w jednostkach czasu (skala zdjęć nie jest zachowana).

Wilgotność powietrza, wilgotność piasku

Obserwacji doświadczenia dokonywaliśmy przy zmiennych warunkach atmosferycznych, co spowodowało istotny wpływ wilgotności powietrza na doświadczenie. Zauważyliśmy, że piasek badany przy większej wilgotności ulega słabszemu napowietrzeniu, jest ściślej ułożony, a więc objętość powietrza znajdująca się w nim jest mniejsza, co powoduje niemożność dużego zagłębienia się kulki. Pionowa kolumna obserwowana przy piasku, który pobrał wilgoć z powietrza, była znacznie mniejsza niż ta, powstała z suchego złoża. Również rozbryzg piasku o mniejszej wilgotności był większy od tego, zaobserwowanego przy dużej wilgotności. Wilgotność powietrza ma wpływ na wilgotność piasku. Rozdrobniona materia ma o wiele większe zdolności do pochłaniania wody z

*warstwa fluidalna - zawiesina drobnych cząstek fazy stałej w strumieniu gazu lub cieczy poruszającym się od dołu do góry[1].

powietrza niż piasek o dużych ziarnach, przez co staje się cięższa i bardziej spoista. Wpływa to na objętościowy udział powietrza w jej pokładach.

Objętościowy udział powietrza.

Objętościowy udział powietrza regulowaliśmy poprzez zmniejszanie objętości napowietrzonego piasku (uciskając go metalową płytką). Zauważyliśmy, że przy mniejszym napowietrzeniu kulka zagłębia się wolniej oraz na mniejszą głębokość, co powoduje zmniejszenie rozmiarów strumienia piasku oraz zmniejszenie rozbryzgu. Objętościowy udział powietrza wpływa na gęstość upakowania ziarnistego medium w pojemniku. Im większe ciśnienie powietrza wewnątrz pokładów piasku, tym mniejsza siła oporu, gdyż powietrze, znajdujące się w poddanym fluidyzacji piasku, przepływa wokół kulki, częściowo unosząc ziarenka piasku, co powoduje zmniejszenie siły tarcia pomiędzy medium a kulką.

Prędkość wpadnięcia

Zaobserwowaliśmy, że prędkość, z jaką kulka wpada w pokłady piasku wpływa na wysokość powstającego pionowego strumienia piasku - im większa prędkość, tym słup powstaje wyższy.

Gęstość kulki

Odnotowaliśmy, że mosiężna kulka powoduje większe i szybsze zagłębienie się jej w pokładach piasku niż stalowa kulka, w wyniku czego powstaje większy strumień. Ujawnia się tu wpływ gęstości kulki na przebieg doświadczenia.

4. Opis jakościowy

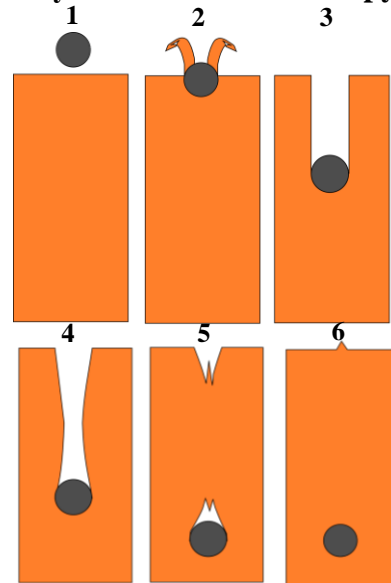
W odpowiednich warunkach piasek może posiadać pewne cechy charakterystyczne nie tylko ciała stałego, ale również cieczy i gazu. Dzieje się to podczas tzw. procesu fluidyzacji gazowej, podczas którego może on przyjąć cechy charakterystyczne dla różnych stanów skupienia. Drobna, stała materia przyjmuje stan pseudopłynny, w którym występuje intensywne cyrkulacja[2]. Zjawisko to spowodowane jest przepływem gazu przez materię.

Kulka wrzucona w tak przygotowany piasek zagłębia się powodując najpierw

utworzenie rozbryzgu, a następnie wyrzucenie w górę kolumny piasku. Mechanizm ten napędzany jest siłą grawitacji i siłami będącymi wynikiem różnic ciśnień.

Całość zakończona jest opadnięciem pionowej kolumny oraz wypłynięciem powstałej w pokładach bańki powietrza ponad powierzchnię.

Podzielmy doświadczenie na etapy:



Ryc.3.Uproszczony schemat 2D obrazujący kolejne etapy doświadczenia.

1) swobodny spadek kulki.

Swobodny spadek kulki opisują proste równania ruchu, z których wynika, przy pominięciu siły oporu powietrza, że kulka spada z przyspieszeniem $a=g$ osiągając w momencie zetknięcia się z powierzchnią piasku prędkość równą:

$$V_0 = at_0 \quad (1)$$

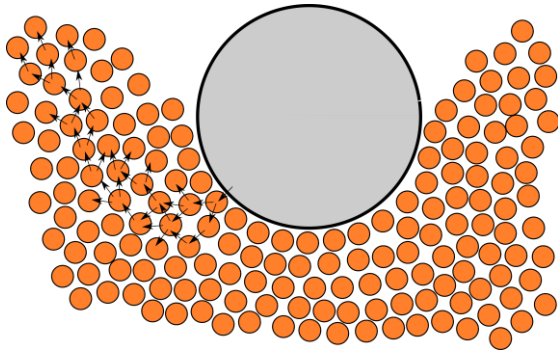
po czasie równym:

$$t_0 = \sqrt{\frac{2h}{a}} \quad (2)$$

gdzie g – przyspieszenie grawitacyjne, m – masa kulki, h – wysokość spadku kulki.

2) Zderzenie kulki z piaskiem i powstanie rozbryzgu.

Zderzenie kulki z powierzchnią piasku oraz jej penetracja wewnątrz pokładów powodują powstanie krateru, który następnie zanika. Mechanizm ten można opisać za pomocą oddziaływań między poszczególnymi ziarenkami piasku(ryc. 4).



Ryc.4. Uproszczony model zachowania się ziarenek piasku w momencie zderzenia z pociskiem. (strzałki pokazują przykładowe przekazywanie pędu pomiędzy kulką a ziarenkami piasku).

Stalowa kulka w momencie zderzenia z powierzchnią oraz zagłębiania się przekazuje ziarenkom piasku część swojego pędu oraz energii kinetycznej, która powoduje powstanie rozbryzgu, zgodnie z wzorem:

$$mgh = E_{kz} + E_{kkulki} + W_1 \quad (3)$$

gdzie h – wysokość zrzutu kulki, E_{kz} – sumaryczna energia kinetyczna, jaką uzyskały ziarenka piasku w momencie zderzenia, E_{kkulki} – energia kinetyczna kulki tuż po zderzeniu, W_1 praca wykonana przeciw siłom oporu.

Zjawisko to można przedstawić za pomocą uproszczonego modelu opartego na ruchu sfer (w rzeczywistości ziarenka piasku przyjmują nieregularne kształty). Od chwili zderzenia kulka zaczyna wytracać swoją energię kinetyczną, zmniejszając swoją prędkość. Spowodowane jest to siłą tarcia, reakcji ziaren oraz międzycząstkowymi kolizjami. Na kulkę działa wówczas siła tarcia i reakcji piasku, a więc wypadkowa siła F_w na nią działająca, dana jest wzorem:

$$F_w = -mg + F_t + R \quad (4)$$

gdzie F_t jest siłą tarcia pomiędzy pociskiem a ziarnami piasku, R siłą reakcji działająca na kulkę, a przyspieszenie kulki o masie m , na którą działa siła F_w , można zapisać przy użyciu Drugiego Prawa Dynamiki Newtona:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g - \frac{F_t + R}{m} \quad (5)$$

Prędkość kulki jest ważna gdyż jest jednym z czynników warunkujących powstawanie pionowej kolumny piasku.

3) Penetracja kulki w piasku

Zagłębianie się kulki w piasek wynika z oddziaływań pomiędzy ziarenkami piasku oraz obecności otaczającego gazu. Kulka wpada w piasek z prędkością początkową V_0 , a towarzyszące zagłębianiu procesy można opisać równaniem:

$$E_{kkulki} = E_{kz2} + W_2 - \Delta E_p \quad (7)$$

gdzie E_{kz2} jest energią kinetyczną przekazaną ziarenkom podczas penetracji, W_2 jest pracą przeciw siłom tarcia, ΔE_p jest zmianą energii potencjalnej kulki.

Zatrzymanie kulki spowodowane jest siłą tarcia piasku oraz licznymi kolizjami pomiędzy ziarenkami a kulką. Głębokość, jaką osiągnie, zależna jest od jej energii przy powierzchni oraz od stosunku jej gęstości do gęstości piasku.

4) Powstanie strumienia

W wyniku penetracji kulki tworzy się przestrzeń przyjmująca kształt cylindrycznej jaskini, której szerokość zależna jest od promienia kulki. Przestrzeń ta, powodowana siłą grawitacji, gwałtownie zamyka się. W wyniku stosunkowo małej ściśliwości piasku, skupia się on wzdłuż centrum jaskini, powodując gwałtowny skok ciśnienia. Implikuje to powstanie dwóch kolumn wzdłuż osi symetrii jaskini – jednej do góry, ponad powierzchnię, a drugiej do dołu, w głąb pokładów. W tym samym czasie kulka może zagłębiać się nadal (pod warunkiem odpowiednio dużej prędkości i stosunku gęstości kulki do gęstości otoczenia). Podczas, gdy wyższe partie górnej kolumny unoszą się wciąż do góry, jej dolna część opada już w dół. Spowodowane jest to niesprężystym oddziaływaniem między cząstkami piasku. Opadająca kolumna, pomimo braku napięcia powierzchniowego, dzieli się, analogicznie do opadającej kolumny wody. Po zapadnięciu się przestrzeni stworzonej przez opadającą kulkę, w piasku zostaje „uwięziona” powietrzna bańka.

5) Wydostanie się powietrznej bańki ponad powierzchnię piasku.

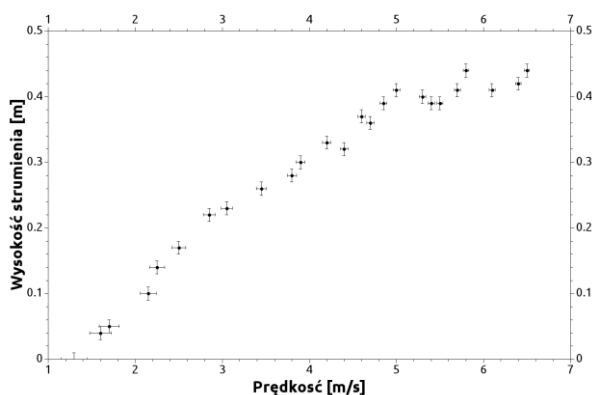
„Uwięziona” bańka powietrza po powstaniu górnej i dolnej kolumny piasku wypływa ponad powierzchnię w miejscu ukazania się górnej kolumny. Ostatecznie, na powierzchni tworzy się niewielki stożek piasku, występujący również w morfologii niektórych naturalnych kraterów.

6) Końcowe położenie kulki.

Ostatecznie okazuje się, że w ostatniej fazie ruchu kulka nieznacznie unosi się ku górze, co spowodowane jest ruchem dolnych warstw piasku pod wpływem naporu wyższych warstw.

5. Pomiary

Przebieg doświadczenia ujawnia się przede wszystkim w powstawaniu rozbryzgu oraz pionowego strumienia piasku wyrzuczonego ponad jego powierzchnię. Mając na uwadze fakt, że powstawanie strumienia jest fenomenem fizycznym zachodzącym w tym doświadczeniu, postanowiliśmy zbadać za pomocą kamery wpływ różnych czynników na jego wysokość. Pierwszym czynnikiem była prędkość, jaką kulka osiągała w momencie wpadnięcia w pokłady piasku. W celu zbadania tej zależności, kulkę o promieniu $R = 1,52$ cm zrzucaliśmy z różnych wysokości, obliczając jej prędkość w chwili zderzenia z powierzchnią piasku. Następnie na podstawie analizy filmów nanosiliśmy dane na wykres. Wyniki badań przedstawione są na wykresie 1.

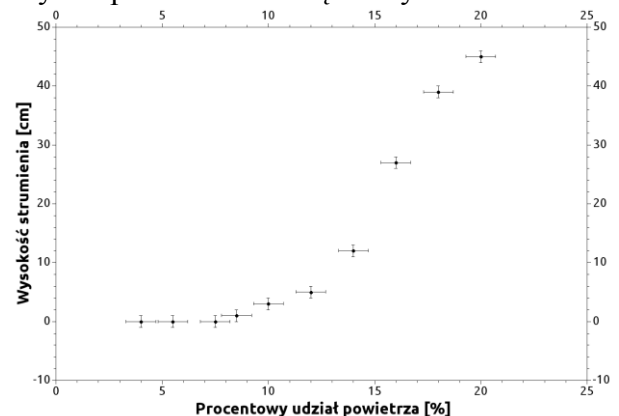


Wyk. 1: Wykres wysokości strumienia piasku w zależności od prędkości, z jaką uderza w warstwę piasku.

Widać na nim, że wysokość strumienia początkowo rośnie szybko wraz ze

wzrostem prędkości kulki, a następnie wzrost wysokości strumienia jest powolny. Przyrost wysokości kolumny piasku może być związany z ilością energii przekazanej ziarenkom piasku przez kulkę, a późniejszy powolny wzrost może być spowodowany ograniczeniami jakie wynikają z wielkości pojemnika, co zgadza się z naszymi obserwacjami.

Zmierzyliśmy również zależność pomiędzy objętościowym udziałem powietrza w pokładach piasku a wysokością strumienia. W tym celu zrzucaliśmy stalową kulkę o promieniu 1,52 cm ze stałej wysokości równej 1,3 m ponad powierzchnią piasku, zmieniając stopień napowietrzenia (regulując go metalową płytką). Procent objętości powietrza mierzyliśmy porównując objętość piasku nienapowietrzonego z napowietrzonym. Wyniki przedstawione są na wykresie 2.

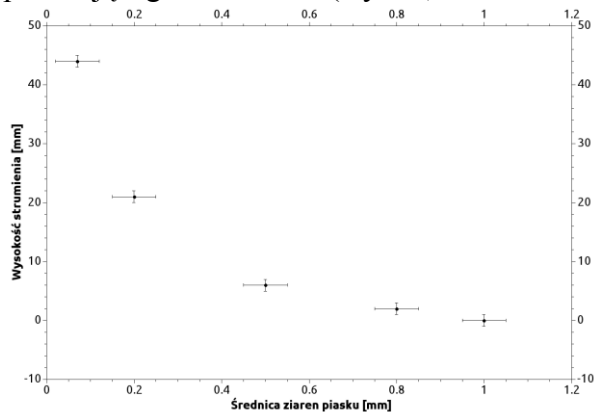


Wyk.2: Wykres wysokości strumienia w zależności od objętościowego udziału powietrza w pokładach piasku.

Widać, że powstawanie oraz wysokość strumienia zależy od napowietrzenia piasku. Poniżej granicznej zawartości powietrza kulka nie zagłębia się w pokładach piasku, a strumień nie powstaje. Po osiągnięciu tej wartości wynoszącej 8,5%, wysokość strumienia początkowo rośnie wolno, a następnie osiągane wyniki szybko przyjmują większą wartość. Zgadza się to z wnioskami wyciągniętymi z obserwacji zjawiska. Przyпускаjemy, że po osiągnięciu krytycznej wartości strumień wraz z przyrostem napowietrzenia zacznie się zmniejszać, ze

względu na zbyt niskie ciśnienie wywierane przez piasek.

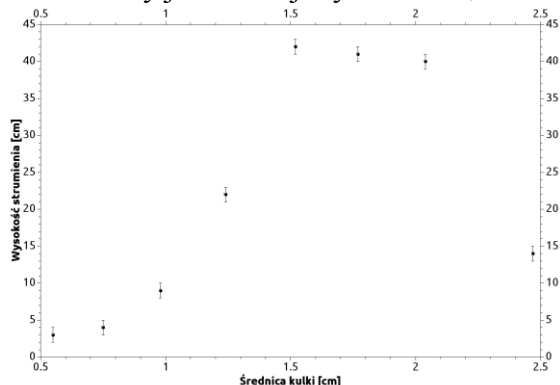
Postanowiliśmy zbadać również wpływ wielkości ziarenek piasku na powstawanie strumienia. Zrzucając kulkę o promieniu 1,52 cm ze stałej wysokości (1,3 m) w pokłady piasku o oszacowanej, średniej średnicy ziarenek, zmierzonych za pomocą suwmiarki, mierzyliśmy wysokość powstającego strumienia (wyk. 3).



Wyk.3: Wykres wysokości strumienia piasku w zależności od średnicy ziarenek piasku, w który wpada kulka.

Zgodnie z oczekiwaniami, wraz ze zmniejszaniem średnicy ziarenek piasku, wysokość strumienia rosła, początkowo powoli, następnie szybciej. Spowodowane jest to lepszą możliwością wprowadzenia w fazę fluidalną małych ziarenek.

Dokonaliśmy również pomiarów wysokości strumienia piasku w zależności od promienia kulki (wyk.4). Do tych badań użyliśmy ośmiu stalowych kulek o różnych promieniach od 0,55 cm do 2,47 cm i zrzucaliśmy je ze stałej wysokości 1,3 m.



Wyk.4: Wykres wysokości strumienia w zależności od promienia kulki, uderzającej w pokłady piasku.

Wysokość powstającego strumienia piasku rosła, a następnie po uzyskaniu maksymalnej wartości utrzymywała się na podobnym poziomie. Dla kulki o

promieniu 2,47 cm, wysokość strumienia gwałtownie zmalała co można wytłumaczyć ograniczeniami stawianymi przez pojemnik. Zmniejszające się pokłady piasku biorące udział w zapadaniu się jaskini powodowały zbyt mały skok ciśnienia po penetracji największej kulki.

6. Wnioski.

Zarówno analiza teoretyczna, obserwacje oraz pomiary potwierdziły wpływ rozważanych przez nas czynników na przebieg doświadczenia. Jak wykazały pomiary zarówno prędkość kulki w momencie zderzenia z powierzchnią piasku, objętościowy udział powietrza w pokładach piasku, wielkość ziarenek powietrza oraz promień kulki wpływają na możliwość powstania strumienia piasku oraz jego rozmiar. Istotnymi parametrami warunkującymi zjawisko okazała się również gęstość kulki oraz szerokość pudełka, w którym umieszczony jest piasek. Również wilgotność powietrza odgrywa wielką rolę, gdyż pochłonięta wilgoć z powietrza powoduje, że ziarna są cięższe, a ich pokłady bardziej spoiste, co implikuje ograniczenie napowietrzenia piasku, które wpływa na przebieg doświadczenia.

7. Perspektywy dalszej pracy.

Zamierzamy zbadać zależność stosunku gęstości kulki do gęstości piasku na przebieg doświadczenia, dokładny wpływ wilgotności powietrza oraz ciśnienia, zachowanie się pojedynczych ziarenek piasku oraz przebieg doświadczenia, kiedy kulka wpada pod kątem innym niż prosty.

8. Bibliografia.

- [1] fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~zmp/zaoczni/MP2/wyklad13.ppt
- [2] http://www.itc.polsl.pl/aksiadz/www_it_c_pliki/lab/fluidyzacja.pdf
- [3] A. Seguin, Y. Bertho, P. Gondret, J. Crassous. "Sphere penetration by impact in a granular medium: A collisional process." Eur. Phys. Lett. 88
- [4] S. von Kann, S. Joubaud, G.A. Caballero-Robledo, D. Lohse, D. van der Meer. "Effect of finite container size on granular jet formation." Phys. Rev. E 81
- [5] S. T. Thoroddsen A.Q. Shen "Granular jets"
- [6] A. Valancea, J. Crassous "Granular medium impacted by a projectile: Experiment and model"
- [7] D.Lohse, R.Bergmann, Ch.Zeilstra, D. van der Meer, M.Versluis, K. van der Weele, M. van der Hoef, H.Kuipers. "Impact on soft sand: Void collapse and jet formation." Phys. Rev. Lett. 93