



# Modelowanie elementarnego aktu flotacji

## Modeling of Flotation Elementary Act

Lena NAZIMKO <sup>1)</sup>, Nataliya ZVIAGINTSEVA <sup>2)</sup>, Alona NAD <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Prof., Ph.D.; Institute of Mining and Geology, Mining Faculty, SHEI National Technical University of Donetsk; 56 Artema, 83001, Donetsk, Ukraine; e-mail: ele-nazimko@ukr.net

<sup>2)</sup> Ing.; Institute of Mining and Geology, Mining Faculty, SHEI National Technical University of Donetsk; 56 Artema, 83001, Donetsk, Ukraine; e-mail: nt\_ua@mail.ru

<sup>3)</sup> M.Sc. Eng.; Institute of Non-ferrous Metals, 5 Sowińskiego, 44-100 Gliwice, Poland; e-mail: anad@imn.gliwice.pl

### Streszczenie

Artykuł jest poświęcony badaniu symulacyjnym elementarnego aktu flotacji węgla przy użyciu pakietu oprogramowania. Wykazano, że tworzenie kompleksu flotacji, a czas jego trwałego istnienia zależy od warunków zderzenia cząstki węgla i pęcherzyka powietrza przy stałych parametrach oddziałujących elementów. Ustalono wpływ ugięcia powierzchni pęcherzyka na wytrzymałość przyłączenia się cząstki.

Słowa kluczowe: węgiel, flotacja, modelowanie

### Wstęp

Metoda flotacji jest najbardziej wydajnym procesem wzbogacania mułów węglowych, szczególnie dla węgla koksujących. Flotacja powszechnie wykorzystywana jest przy wzbogacaniu różnego rodzaju rud. Nie mniej jednak, pozostają nierozwiązane pytania, wymagające badań i tłumaczeń.

Szczególnie trudne do badania są procesy zachodzące podczas oddziaływania faz w trakcie tworzenia kompleksu flotacji (połączenie pęcherzyka z minerałem) oraz jego przemieszczenia. W danym przypadku odbywa się mechaniczne oraz fizyko-chemiczne oddziaływanie pomiędzy powierzchniami faz kontaktu, zależne od stanu faz, który jest określany przez różne parametry [1, 2].

Badania wykazały, że podczas zderzenia pęcherzyka powietrza i cząsteczki węgla styczna prędkość cząstki wzrasta wraz ze zwiększeniem kąta między fazami [3, 4]. Przy wartościach krytycznych dany składnik prędkości wywołuje poślizg cząstki po powierzchni pęcherzyka i w efekcie końcowym jej oderwanie. Zmniejszenie prędkości cząstek poruszających się po powierzchni warstwy adsorpcyjnej pęcherzyka odbywa się przede wszystkim przez zmianę lepkości tej warstwy.

### Metoda modelowania

Modelowanie zostało przeprowadzone przy pomocy metody elementów dyskretnych [5, 6]. Model uwzględnia właściwości faz, wytrzymałość połączeń między nimi, opór ośrodka, warunki początkowe

### Summary

The article deals with the simulation modeling of coal flotation elementary act by means of computer programs' packet. It was demonstrated that flotation complex formation and its stable lifetime depend on collision conditions of coal particle and bubble for constant agreed parameters of interacting components. Effect of bubble surface inward deflection on strength of particle attachment was determined.

Keywords: coal, flotation, modeling

### Introduction

Flotation method is the most productive process for fine coal preparation especially for coking coals. Flotation has wide application for many ores preparation too. Nevertheless up to the present there remain questions requiring investigation and correction.

In particular it's difficult to research phases' interaction processing for flotation complex formation and changes of its movement. At that time mechanical and physicochemical interaction of contacting phases' surfaces occurs. It depends on its positions for various parameters [1, 2].

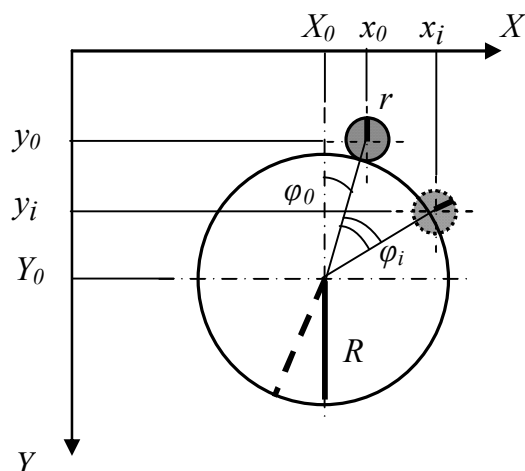
Investigations have determined when coal particle collides with bubble particle velocity tangential component increases for growth of impact angle [3, 4]. For critical values this component excites particle slip relative to bubble surface and its detachment as a result. Decrease in particle velocity keeps at the expense of layer viscosity generally when particle slips on surface of bubble adsorption layer.

### Modeling method

Modeling was done by means of discrete elements method [5, 6]. The model allows for properties of phases, strength connections between them, resistance of medium, boundary and initial conditions.

oraz brzegowe. Konfiguracja modelu wykonana do zbadania elementarnego aktu flotacji cząstki węgla.

Opis szczegółowy i dane wejściowe, wykorzystane dla modelowania podane w pracy [7]. Stan początkowy i bieżący modelu pokazany na rys. 1.



Rys. 1  
Model interakcji cząstki węgla i pęcherzyka powietrza

Fig. 1  
Model of coal particle and bubble interaction

Przeprowadzone były badania interakcji wypływającego ku górze pęcherzyka powietrza z zawieszoną w pulpie cząsteczką przy wysokiej lepkości warstw powierzchniowych reagentów, oraz kącie zderzenia  $\varphi_0 = 5^\circ$ . Została przyjęta stała wielkość pęcherzyków ( $R = 1000$ ), parametry ruchu, właściwości powierzchni dla elementów. Wielkość cząstki węgla w badaniu symulacji zmieniała się w zakresie od 135 do 300 jednostek umownych (jed, umow), które w pakiecie oprogramowania są określone w pikselach, przy zachowaniu współczynnika skali. Przedział czasu był ustalony na  $10^{-6}$ s, liczba cykli rachunków wyniosła 80 000.

### Analiza wyników badań

Po modelowaniu otrzymano obrazy animowane na monitorze i pliki cyfrowe. Pliki te zawierają współrzędne środka ciężkości pęcherzyka i cząstki w każdym momencie czasu obliczeń [8].

Po przetworzeniu plików cyfrowych, otrzymano parametry ruchu elementów: trajektorię, prędkości i przyspieszenie. W chwili zderzenia odbywa się ostry wstrząs, po czym prędkość i przyspieszenie kompleksu są zmniejszone o kilka rzędów wielkości, ale kompleks flotacyjny nadal idzie ku górze. Czas istnienia kompleksu był określony przez obliczenie różnicy S: odległość między środkami ciężkości elementów minus suma ich promieni.

Różnica ta była obliczana z zależności:

$$S = l - (R + r), \quad (1)$$

Model setting was done for investigation of flotation elementary act of coal particle.

Procedure, investigations and initial data for modeling was described in detail in work [7]. Initial and dynamic position of model is illustrated in Figure 1.

Interaction of rising bubble with suspended particle for high viscosity of flotation agents' surface layers and collision angle  $\varphi_0 = 5^\circ$  was considered. Constant bubble size ( $R = 1000$  r.u.), motion parameters, surface properties of elements were given. Coal particle size was changed from 135 to 300 reference units (r.u.) that in program packet were set as pixels when saving of scale coefficient. Time slot for calculation was given  $10^{-6}$ c, quantity of calculation cycles were 80.000.

### Analysis of tests results

Animated images on monitor and numerical files were obtained after modeling. These files contain coordinates of bubble and particle gravity centers at every moment in calculation time [8].

When handling of numerical files motion parameters of elements were got: trajectories, velocities and accelerations. In the collision moment abrupt impulse is observing, after velocity and acceleration of flotation complex are decreased in several degrees. At this time flotation complex is rising. Complex lifetime was calculated as difference S: distance between gravity centers of elements minus these radiuses sum.

This difference (see Fig. 1) can be written as:

gdzie:

- $S$  – różnica (rys. 2);
- $l$  – bieżąca odległość między środkami ciężkości elementów;
- $R$  – promienie pęcherzyka;
- $r$  – promienie cząstki.

Ustalono, że podczas uderzenia cząstki i wypływającego pęcherzyka jego powierzchnia podlega ugięciu aż do pewnej wartości (patrz rys. 2).

Z danych przedstawionych na rys. 2 wynika, że odchylenie powierzchni pęcherzyka odbywa się bez przegięć. Podobne efekty obserwowano podczas przyspieszonego nagrywania wideo dla tworzenia kompleksu flotacji.

Trajektorie elementów pokazanych na rys.3 i rys.4 to trajektorie cząstki we współrzędnych pęcherzyka. Po zderzeniu (punkt A), cząstka ślizga się wzdłuż powierzchni pęcherzyka i jednocześnie wypływa z nim ku górze (rys. 3). Wskazane punkty na trajektorii odpowiadają położeniu cząstki na powierzchni pęcherzyka (rys. 4), które powodują odchylenie jego trajektorii.

Na dolnej półkuli pęcherzyka występuje względny ruch cząstki w lewo-prawo z przemiennością hamowania i przyspieszania. Cząstka porusza się od punktu C do punktu D, a następnie wznosi się do punktu na powierzchni E. Dany ruch powtarza się do 9 razy, co jest pokazane na rys. 4b. Stopniowo prędkość cząstki zanika i cząstka z promieniem 135–160 jedn. umow. bezpiecznie przyczepia się do pęcherzyka w punkcie L.

Przez zwiększeniu promienia cząstki nawet na jedną jednostkę przeczepienie się nie odbywa, trajektorie elementów mają inny wygląd (rys. 5). Po

where:

- $S$  – difference (Fig. 2);
- $l$  – current distance between gravity centers of elements;
- $R$  – bubble radiuses;
- $r$  – particle radiuses.

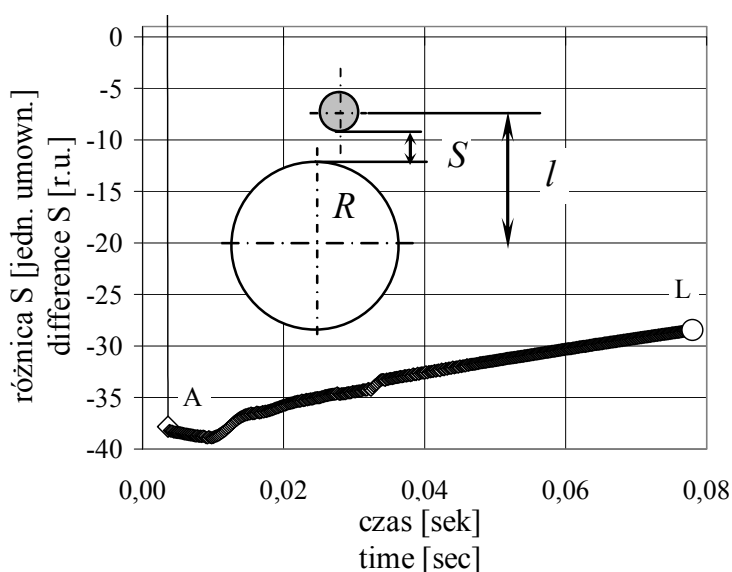
It was determined that bubble surface is deflecting on some value at contact moment of rising bubble and particle.

Data are showed (see Fig. 2) that bubble surface has deflection without its broken. Same effects were observed during rapid filming of flotation complex formation.

Elements' trajectories are presented on Figure 3, particle trajectory in bubble coordinates are presented on Figure 4. After collision (point A) particle slips along bubble surface (see Fig. 3) and floats with bubble in the process. Applicable particle position points on bubble surface are showed (see Fig. 4), this particle motion changes trajectory of bubble motion.

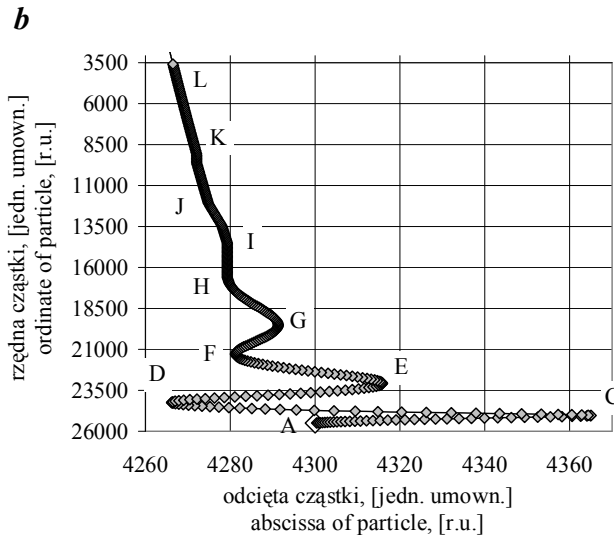
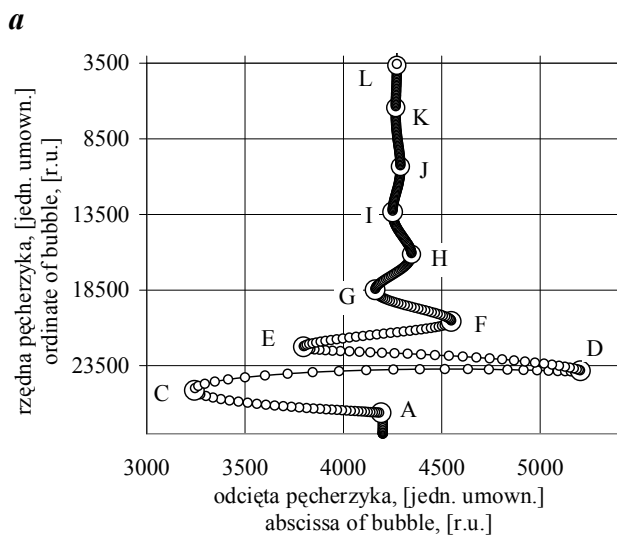
Relative motion of particle to right-to left for interchange of deceleration and acceleration appears along bubble lower hemisphere. Particle is moving from point C to point D, next one is rising along bubble surface to point E. These fluctuation-rounds repeat to 9 times, it's showed in Fig. 4b. Particle velocity subsides gradually and particle with radius 135–160 r.u. attaches on bubble in point L securely.

If particle radius is increased only one unit, attachment doesn't occur. Trajectories of elements have other view (see Fig. 5). After collision in point



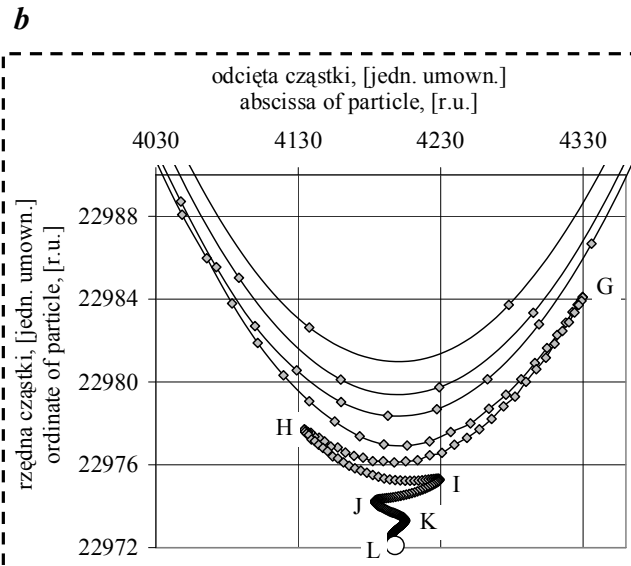
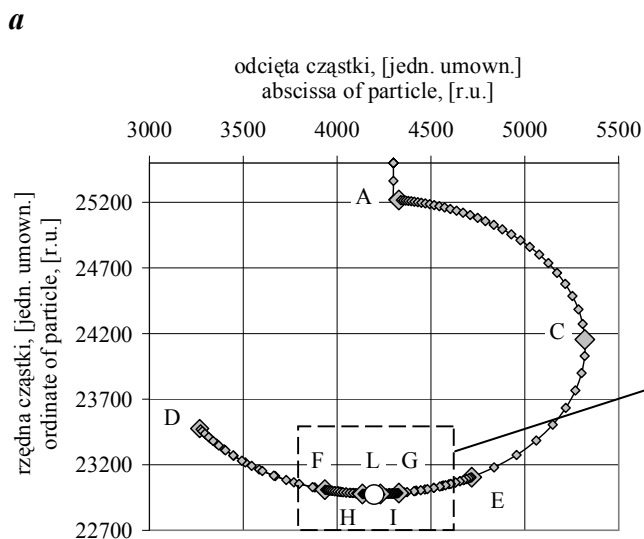
Rys. 2  
Różnica S dla cząstki o średnicy 160 jedn. umown.

Fig. 2  
Difference S for particle with diameter 160 r.u.



Rys. 3  
Trajektoria ruchu:  
*a* – pęcherzyk, *b* – cząstka węgla

Fig. 3  
Trajectories of motion:  
*a* – bubble, *b* – coal particle



Rys. 4  
Trajektoria ruchu cząstki odnośnie pęcherzyka:  
*a* – całkowita trajektoria, *b* – punkt końcowy

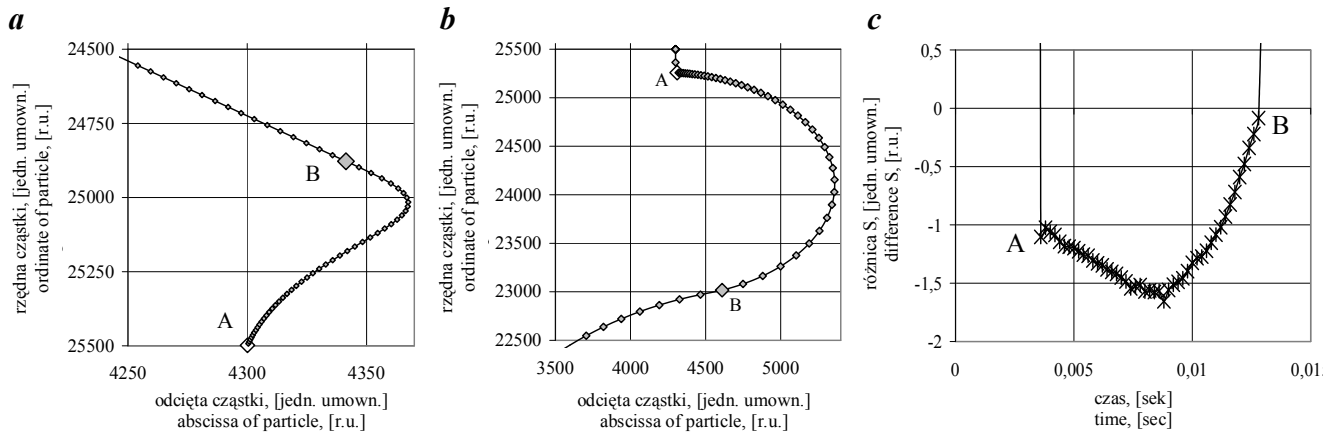
Fig. 4  
Trajectory of particle motion relative to bubble:  
*a* – full trajectory, *b* – finite part

zderzeniu w punkcie A cząstka ślizga się po pęcherzyku, odrywa się w punkcie B i nadal wypływa za nim, powoli hamuje (rys. 5a, b). Czas przebywania cząstki na powierzchni pęcherzyka nagle zmniejsza się (rys. 5b).

Podobne wyniki uzyskano dla cząstek o promieniu 161–265 jedn. umow. Wraz ze wzrostem promienia cząstek do 266–296 jedn. umow. tworzenie kompleksu flotacji i jego długie istnienie wznawia się. Z relacji geometrycznych wyliczona została średnica powierzchni styku faz i jej stosunek do ugięcia  $S$  (rys. 6).

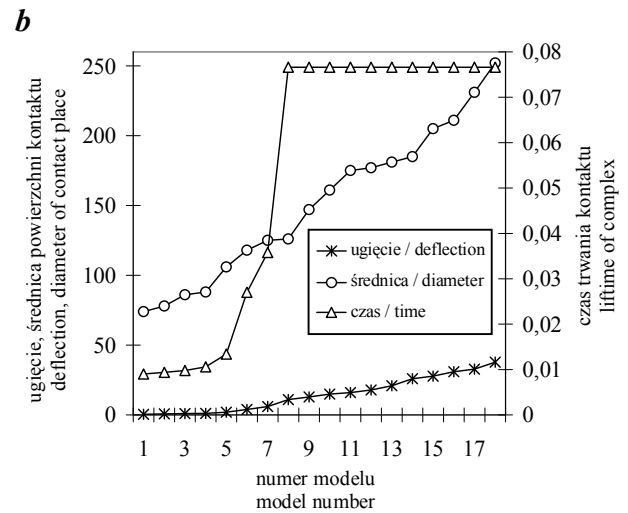
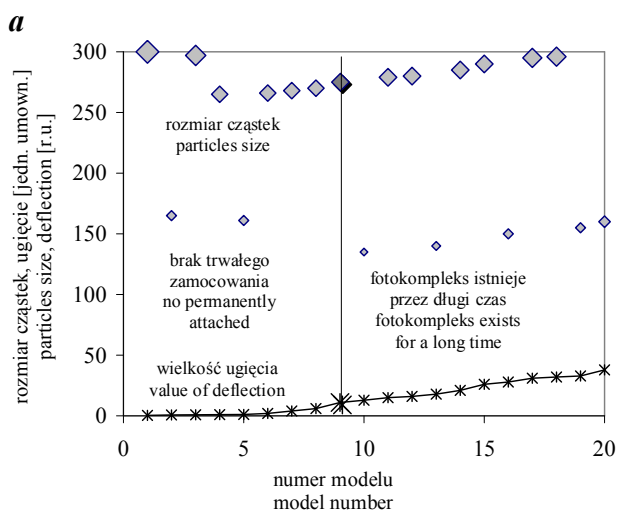
A particle slips along bubble, detaches in point B and continues to float follow with bubble decelerating gradually (see Fig. 5a, b). Staying time of particle on bubble surface goes down (see Fig. 5b).

Similar results were got for particles with radius 161-125 r.u. For particle radius rise to 266-296 r.u. flotation complex formation and its continuous life renews. Diameter of phase contact place and its connection with deflection  $S$  was determined from geometric correlations (see Fig. 6).



Rys. 5  
Trajektoria cząstki z promieniem 161 jedn. umown. i wielkość S:  
a – razem z kompleksem i po jego rozerwaniu;  
b – odnośnie pęcherzyka; c - różnica (ugięcie) S

Fig. 5  
Trajectory of particle (radius 161 r.u.) and value S:  
a – together with flotation complex, and after its broken;  
b – relative to bubble; c – difference (deflection) S



Rys. 6  
Stosunek wielkości odchylenia powierzchni pęcherzyka z rozmiarem cząstki (a), średnicą powierzchni kontaktu i czasem trwania kompleksu flotacji (b)

Fig. 6  
Correlation of bubble surface deflection value with particle size (a), diameter of contact place and lifetime of flotation complex (b)

Dane przedstawione na rys. 6a pokazują że odkształcenie powierzchni pęcherzyka  $S$  może mieć różne wartości, niezależnie od wielkości cząstek. Decydującymi czynnikami są warunki kontaktu faz.

Według równania Frumkina-Kabanova siła przyzwiązania się cząstki do pęcherzyka  $F$  równa się:

$$F = \pi a \sigma_{\text{ж-г}} \sin \theta, \quad (2)$$

gdzie:

- $a$  – średnica powierzchni kontaktu faz,
- $\sigma_{\text{ж-г}}$  – powierzchniowe napięcie na granicy rozdziału faz „ciecz-gaz”,
- $\theta$  – kąt zwilżania.

where:

- $a$  – diameter of phase contact place,
- $\sigma_{\text{l-g}}$  – surface tension on interface “liquid-gas”,
- $\theta$  – interfacial angle.

Przy stałych wartościach  $\sigma_{c-g}$  i  $\theta$  siła przyczepienia się  $F$  jest proporcjonalna do wielkości  $a$ , która jest związana z odkształceniem powierzchni pęcherzyka  $S$ . Z kolei ugięcie powierzchni  $S$  zależy od czasu i warunków zderzenia się pęcherzyka i cząstki, elastyczności powłoki pęcherzyka, właściwości adsorpcyjnych warstw spieniacza na jej powierzchni. W związku z tym, podczas flotacji cząstek o różnych rozmiarach należy dobrać speniacze, które powodują odpowiednią lepkość warstw adsorpcyjnych.

## Wnioski

Przeprowadzone badania modelowania aktu flotacji pozwoliły określić wpływ właściwości powierzchni pęcherzyka na warunki tworzenia kompleksu flotacji i jego żywotność.

For constant values  $\sigma_{l-g}$  and  $\theta$  attachment force  $F$  is directly proportional to value  $a$  which is relating to bubble surface deflection  $S$ . By-turn bubble surface deflection  $S$  depend on moment and conditions of particle and bubble collision, flexibility of bubble cover, properties of frother adsorption layers on bubble surface. Therefore for flotation of different particle sizes is necessary to choose frothing agents securing defined viscosity of adsorption layers.

## Conclusion

Completed simulation test made it possible to determine effect of bubble surface property on conditions of flotation complex formation and its lifetime.

## Literatura – References

1. Basarova P., Hubicka M., Vejrazka J. 2012: *Theoretical description of a motion of a spherical bubble in neighborhood of a falling particle. XXVI International Mineral Processing Congress 2012 Proceedings / New Delhi, India.*
2. Fečko P., Hlavatá M., Podešvová M., Mucha N., Király A. 2011: *Zastosowanie nowych odczynników flotacyjnych do flotacji mułów węglowych z kopa Ini Darkov. Journal of Polish Mineral Engineering Society – January-June – 2011.*
3. Назимко Е. И., Друц И. Н. 2011: *Исследование кинетики взаимодействия фаз в динамической среде при обогащении минералов // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ. – 2011. - №1. - С.336-339.*
5. Cundall P. A., Strack O. D. L. 1979: *A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29:1, 47–65 (1979).*
6. Bruno M. S. et al. 1996: *Some influences of saturation and fluid flow on sand production: Laboratory and Discrete Element Model Investigations. SPE 36534, Proc. 1996 SPE Ann. Tech. Conf., Denver, Colorado, 6–9 October, 447–461.*
7. Гарковенко Е. Е., Назимко Е. И., Самойлов А. И., Папушин Ю. Л. 2002: *Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. Донецк: Норд-Пресс. – 2002. – 266 с.*
8. Nazimko, L. I., Corchevsky A. N., Druts I. N. 2006: *Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation // Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. China. 2006. pp. 775-781.*