

В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, Н.С. Плотников, В.В. Потапов

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ГИДРООБЕСПЫЛИВАНИЯ НА ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Предложены метод вихревого высоконапорного гидрообеспыливания, основанный на принципе вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции в системе «жидкое—твердое» и математическая модель вихревого гидрообеспыливания, показано снижение величины потребной энергии полного поглощения абсолютно гидрофобных частиц пыли каплями жидкости при интенсивном закручивании капель жидкости. Уточнена графическая модель взаимодействия в зоне контакта в момент соударения в системе «твердое—жидкое», установлено, что площадь контакта капли жидкости с частицей пыли оказывает непосредственное влияние на величину краевого угла смачивания. Получены уравнения для расчета значений критериев Стокса и Рейнольдса в условиях вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции. Получены уравнения для расчета величины снижения потребной энергии полного поглощения частиц пыли и для расчета эффективного краевого угла смачивания и минимального диаметра поглощаемых частиц пыли в функции от угловой скорости вращения капель жидкости. Доказаны существенное увеличение поверхности смачивания и краевого угла смачивания в условиях вихревой кинематической коагуляции и снижение медианального размера диспергированного состава частиц пыли, повышение эффективности пылеподавления, снижение расхода воды в условиях вихревого гидрообеспыливания. Установлено, что снижение энергетических барьеров в условиях вихревой коагуляции обусловлено увеличением значений критериев Стокса и Рейнольдса, при вращении капли жидкости по сравнению с их значениями, рассчитанными без учета вращения капли жидкости.

Ключевые слова: гидрообеспыливание, вихревая инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция, гидрофобность, краевой угол смачивания, кинематическая коагуляция.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-210-217

Пылеподавление при помощи азрированных частиц жидкости — гидрообеспыливание является одним из наиболее распространенных средств обеспечения санитарно-гигиенических условий в технологиях горного производства.

Существенное влияние на эффективность пылеподавления оказывают плотность орошения и удельный расход воды. Заметный рост эффективности пыле-

подавления наблюдается при удельном расходе воды не менее 50 л на 1 т добытого угля. Низконапорное орошение не улавливает мелкие фракции пыли, наиболее пневмокопиозоопасные для человеческого организма. При этом остаточная запыленность не обеспечивает безвредные условия труда [1].

Резервом роста эффективности гидрообеспыливания является повышение

давления жидкости на выходе из форсунок. Это обусловлено тем, что эффект пылеподавления в существенной мере сводится к преодолению энергетического барьера и переводу системы «твердое–жидкое» в более устойчивое состояние, т.е. определяется степенью коагуляции и способностью капель жидкости схватывать частицы пыли [2].

При высоконапорном гидрообеспыливании существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов обеспечения санитарно-гигиенических условий в шахтах и как результат приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в горном производстве [3, 4].

Актуальность задачи совершенствования технологии высоконапорного гидрообеспыливания как составной части программы внедрения экологического недропользования требует нового подхода к построению графо-аналитической модели инерционной ортокинетической гетерокоагуляции воднопылевого аэрозоля [5].

Целью моделирования кинематических и динамических параметров системы «капля жидкости — частица пыли» в процессе предлагаемой вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции является исследование механизма кинематической коагуляции в условиях действия присоединенного вихря в зоне контакта индуцированного вращающейся каплей жидкости [10, 11]. Математическая модель вихревой кинематической коагуляции, использующей вышеуказанный принцип, послужит основой подготовки рекомендации по совершенствованию технологического оборудования динамического высоконапорного гидрообеспыливания, созданию энергоэффективных вихревых форсунок для установок пылеподавления.

Фиксация частиц, приблизившихся к капле на расстояние действия адгезион-

ных сил, зависит от величины краевого угла смачивания  $\theta$ . Для захвата гидрофобных частиц пыли каплей жидкости необходимо совершить работу внешних инерционных сил, которая соответствует кинетической энергии взаимодействия в процессе их контакта  $W_k$ . Захват частицы пыли каплей жидкости произойдет при условии, когда кинетическая энергия  $W_k$  будет больше или равна энергии поглощения  $\Pi_{ж-г}$ , соответствующей сумме энергии адгезии, определяемой удельной энергией отрыва, и энергии смачивания, определяемой удельной энергией растекания [6–9].

Используя известное выражение кинетической энергии частицы пыли как твердого тела  $W_k$  и энергии поглощения ее жидкостью  $\Pi_{ж-г}$ , с учетом вышеизложенного условие полного захвата частицы пыли с минимальным диаметром  $d_{nm}$  каплей жидкости после соответствующих преобразований получим в виде:

$$d_{nm} = 24 \frac{2\delta_{ж-г} \cos \theta}{(\rho_n - \rho_r)(V_{ж} - V_r)^2}, \quad (1)$$

где  $d_{nm}$  — минимальный диаметр поглощаемой частицы пыли, м;  $\rho_n$  и  $\rho_r$  — плотность частицы пыли и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{ж}$  и  $V_r$  — скорость капли жидкости и газа соответственно, м/с;  $\delta_{ж-г}$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред «жидкость–газ», Дж/м<sup>2</sup>;  $\theta$  — краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость–газ», рад.

Из анализа графической модели взаимодействия в зоне контакта в момент соударения в системе «твердое–жидкое», приведенной на рис. 1 и формулы (1) видно, что площадь контакта капли жидкости с частицей пыли оказывает непосредственное влияние на величину краевого угла смачивания  $\theta$ . Чем меньше радиус кривизны поверхности капли в зоне контакта, т.е. меньше ее размер, тем меньше краевой угол смачивания  $\theta$ ,

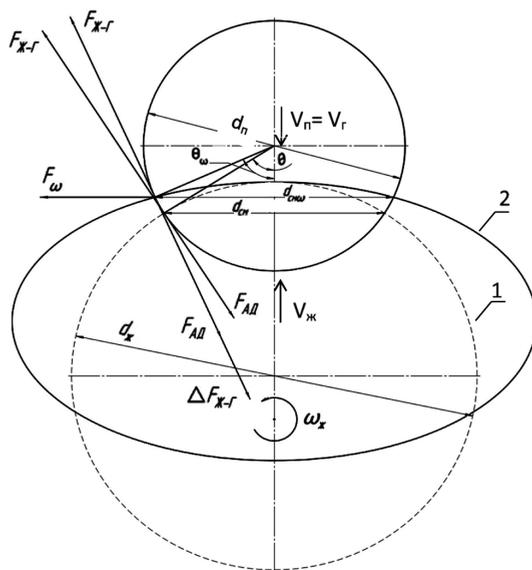


Рис. 1. Графическая модель вихревой кинематической коагуляции частицы пыли каплей жидкости: 1 — классическая инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция,  $\omega_{\text{ж}} = 0$ ; 2 — вихревая инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция,  $\omega_{\text{ж}} > 0$

а следовательно, тем больше потребуются затраты энергии для полного поглощения частицы пыли диаметром  $d_{\text{пм}}$  каплей жидкости, определяемой поверхностной энергией отрыва и растекания.

С ростом краевого угла смачивания  $\theta$  величина энергии поглощения  $\Pi_{\text{ж-г}}$  снижается, что позволяет обеспечить заданный уровень эффективности обеспыливания.

Критериями подобия определяющими идентичность кинематических, инерционных и аэродинамических явлений коагуляции, то есть переход системы «частицы пыли в капле жидкости» в устойчивое энергетическое состояние являются инерционные критерии Стокса ( $Stk$ ) и Рейнольдса ( $Re$ ), характеризующие соотношение сил инерции и вязкости в трехфазной среде «жидкое–твердое–газообразное» [6–8].

Экспериментально установлено, существование аэродинамического энергетического барьера, препятствующего переходу системы «жидкое–твердое» на более высокий энергетический уровень

коагуляционного взаимодействия при низких значениях кинетической энергии взаимодействия капли жидкости и частицы пыли, что соответствует критическим значениям критерия Стокса, при которых невозможен захват частиц пыли [6, 7].

Влияние кинематических и динамических параметров вращения капли жидкости на аэродинамический поверхностно-адгезионный энергетический барьер и краевой угол смачивания показано на графической модели вихревой инерционной оптокинетической гетерокоагуляции при взаимодействии частицы пыли с вращающейся с угловой скоростью  $\omega_{\text{ж}}$  каплей жидкости, представленной на рис. 1.

При вращении капли жидкости с угловой скоростью  $\omega_{\text{ж}}$  вокруг ее поверхности и в зоне контакта согласно условию Гельмгольца-Бернулли создается область разрежения, т.е. пониженного статического давления на величину удельной энергии присоединенного вихря  $\Delta W_{\text{к}}$ , скорость которого согласно гидродинамической аналогии определяется по известной в

теории электродинамике формуле Био-Саварра. Таким образом присоединенный вихрь обусловленный вращением капли жидкости, снижая статическое давление в зоне ее контакта с частицей пыли способствует снижению аэродинамического энергетического барьера [12].

Изменение кинематических параметров, характеризующих взаимодействие частицы пыли и капли жидкости в зоне контакта при соударении приводит к существенным изменениям фактических значений критериев Стокса и Рейнольдса, которые в условиях вихревой кинематической коагуляции определяются по формулам:

$$Stk_{\omega} = \frac{d_n^2 (\rho_n - \rho_r) \sqrt{(V_{ж} - V_n)^2 + 0,25\omega^2 d_n^2 \sin^2 \theta}}{18\mu_r d_{ж}} ;$$

$$Re_{ж\omega} = \frac{d_{ж} \rho_r \sqrt{(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25\omega^2 d_n^2 \sin^2 \theta}}{\mu_r} , \quad (2)$$

где  $d_{ж}$  — диаметр капли жидкости, м;  $V_n = V_r$  — скорость перемещения частицы пыли, м/с;  $\rho_n$  и  $\rho_{ж}$  — плотности частицы пыли и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_r$  — коэффициент динамической вязкости газа, кг/мс.

Таким образом вращательное движение капли жидкости увеличивает фактическое эффективное значение критериев Стокса  $Stk_{\omega}$  и Рейнольдса  $Re_{ж\omega}$  в зоне контакта способствуя снижению, как запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера, так и критического уровня аэродинамического энергетического барьера.

Снижение потребной энергии для полного поглощения частицы пыли вращающейся каплей жидкости, равное работе силы депрессии в зоне контакта на длине частицы пыли можно выразить уравнением:

$$\Delta\Pi_{ж-г} = \Delta F_{ж-г} d_n = (1/2) \Gamma_{\omega} \omega_{ж} d_n S_{к}, \quad (3)$$

где  $\Gamma_{\omega}$  — циркуляция газа в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $S_{к}$  — площадь контакта соответствующая площади смачивания, м<sup>2</sup>;  $\Delta F_{ж-г}$  — сила давления разряжения (депрессия) в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости обусловленная влиянием присоединенного вихря и равная снижению силы поверхностного натяжения, Н.

Уравнение для дополнительной кинетической энергии, снижающей аэродинамический барьер поглощения, то есть фактически уменьшающей потребную кинетическую энергию, равной энергии вихря, присоединенного к вращающейся капли жидкости, с учетом рис. 1, уравнений Бернулли, Остроградского-Гаусса получим в виде [9]:

$$\Delta W_{к} = -\Delta\Pi_{ж-г} = (\pi^2/32) \rho_r d_n^2 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2. \quad (4)$$

С учетом формулы (3) уравнение для силы депрессии в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости обусловленной влиянием присоединенного вихря и равная снижению силы поверхностного натяжения получим в виде:

$$\Delta\Gamma_{ж-г} = (\pi^2/32) \rho_r d_n^4 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2. \quad (5)$$

Для вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции минимальное значение энергии для полного поглощения, с учетом уравнений выше сказанного примет вид:

$$\Pi_{ж-г\omega} = \Pi_{ж-г} - \Delta\Pi_{ж-г} = 2\delta_{ж-г} \cos\theta_{\omega}. \quad (6)$$

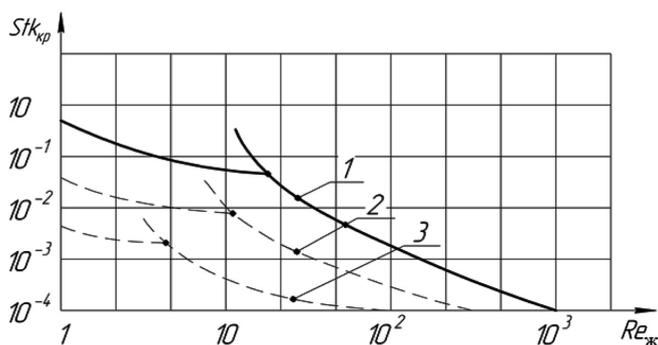


Рис. 2. Изолинии угловой скорости вращения капли воды в функции от критических значений критерия Стокса и Рейнольдса: 1 —  $\omega_{ж} = 0$ ;  $Stk_{кр} = 4,1 \cdot 10^{-2}$ ;  $Re_{ж} = 20$ ;  $d_{пм} = 6 \cdot 10^{-6}$  м; 2 —  $\omega_{ж} = 1,5 \cdot 10^2$  с $^{-2}$ ;  $Stk_{кр} = 9 \cdot 10^{-3}$ ;  $Re_{ж} = 15$ ;  $d_{пм} = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м; 3 —  $\omega_{ж} = 3 \cdot 10^2$  с $^{-2}$ ;  $Stk_{кр} = 5 \cdot 10^{-3}$ ;  $Re_{ж} = 6$ ;  $d_{пм} = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м

С учетом уравнений [4–6] после соответствующих преобразований уравнение для краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы при вращении капли жидкости с угловой скоростью  $\omega_{ж}$  получим в виде:

$$\theta_{\omega} = \arccos \left( \cos \theta - \frac{\pi \rho_r d_n^3 \sin^2 \theta \omega_c^2}{64 \delta_{ж-г} \cos \theta} \right). \quad (7)$$

Таким образом, с учетом предложенной модели инерционной орто-кинетической гетерокоагуляции системы «частица пыли — капля жидкости при вращении частицы жидкости с угловой скоростью  $\omega_{ж}$  минимальный диаметр  $d_{п\omega m}$  частицы пыли полностью поглощаемой в процессе захвата и смачивания каплями жидкости при действии сил поверхностного натяжения, инерционных сил поступательного и вращательного движения может быть записана в виде:

$$d_{п\omega m} = \sqrt[3]{\frac{768 \delta_{ж-г} \left( \cos \theta - \cos \arccos \left( \cos \theta - \frac{\pi \rho_r \omega_{ж}^2 \delta_{ж-г}^2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{(\rho_n - \rho_r)^3 (V_{ж} - V_n)^6} \right) \right)}{\pi \rho_r \sin^2 \theta \omega_{ж}^2}} \quad (8)$$

На рис. 2 приведены результаты расчета по предложенной математической модели вихревой кинематической коагуляции изменения критических значений критерия Стокса  $Stk_{кр}$  в зависимости от угловой скорости вращения капель воды  $\omega_{ж}$  диаметром  $d_{ж} = 6 \cdot 10^{-5}$  м для абсолютно гидрофобных частиц окиси кремния.

Приведенные изолинии угловой скорости вращения каплей жидкости в функции от критических значений критериев Стокса и Рейнольдса подтверждают существенное снижение, как запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц, так и критического уровня аэродинамического энергетического барьера. При угловой скорости вращения каплей жидкости  $\omega_{ж} = 3 \cdot 10^2$  с $^{-1}$ , критическое значение критерия Стокса снижается более чем в четыре раза, а критическое значение критерия Рейнольдса более чем в три раза, по сравнению с их значениями в условиях поступательного движения каплей жидкости, то есть при  $\omega_{ж} = 0$ .

Снижение энергетических барьеров в условиях вихревой коагуляции обусловлено, как показано выше (3), увеличением значений критериев Стокса  $Stk_{\omega}$  и Рейнольдса  $Re_{ж\omega}$ , при вращении капли жидкости по сравнению с их значениями  $Stk$ ,  $Re_{ж}$  рас-

считанными без учета вращения капли жидкости, то есть при  $\omega_{ж} = 0$ .

Снижение величины критерия Рейнольдса для капель жидкости при вихревом высоконапорном гидрообеспыливании соответствует уменьшению ее расхода и потребного давления, т.е. повышению ресурса эффективности системы пылеподавления. Приведенные данные показывают, что при вихревом инерционном ортокинетическом гетерокоагуляционном взаимодействии вращающихся капель жидкости и не смачиваемых частиц пыли коэффициент захвата  $\eta_{Stk}$  будет равен коэффициенту коагуляции  $\eta_k$  при существенно меньших значениях критерия Рейнольдса, т.е. при меньших скоростях поступательного движения капли жидкости, либо меньших размерах частицы пыли.

### Выводы

- Вращение капли жидкости, в процессе вихревой инерционной ортокинетической коагуляции, увеличивает фактическое эффективное значение критери-

ев Стокса  $Stk_{\omega}$  и Рейнольдса  $Re_{ж\omega}$ , в зоне контакта способствуя снижению их критических значений.

- Вихревое высоконапорное гидрообеспыливание способствует увеличению угла смачивания, снижению минимального размера абсолютной гидрофобности частиц пыли, уменьшению запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц и критического уровня аэродинамического энергетического барьера.

- Применение вихревых форсунок в установках пылеподавления позволяет уменьшить минимальный размер поглощения абсолютно гидрофобных частиц пыли до  $1,5 \cdot 10^{-6}$  м, то есть существенно уменьшить медианальный размер диспергированного состава частиц пыли, повышая тем самым эффективность пылеулавливания до 99%.

- Вихревая кинематическая коагуляция позволяет на 20% снизить расход воды по сравнению с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием, доведя его до 8 л/т.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ксенофонтова А. И., Бурчаков А. С. Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах. — М.: Недра, 1965. — 232 с.
2. Саранчук В. И., Качан В. П., Рекун В. В. и др. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли. — Киев: Наукова думка, 1984. — 216 с.
3. Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block (SCOPUS) Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 38. No 3. pp. 288–292.
4. Янов А. П., Ващенко В. С., Гагауз Ф. Г. и др. Борьба с пылью и вредными газами в железнорудных шахтах. — М.: Недра, 1984. — 228 с.
5. Журавлев В. П., Саранчук В. И., Страхов И. А. и др. Моделирование и проектирование систем гидрообеспыливания. — Киев: Наукова думка, 1990. — 132 с.
6. Фролов А. В., Телегин В. А., Сечкерев Ю. А. Основы гидрообеспыливания // Безопасность жизнедеятельности. — 2007. — № 10. — С. 1–24.
7. Owyer F. B, Thompson R. L. Ore sorting / Develop and Innosot. Aust. Process Ind // Aust. Chen. Eg. Conf., Newcastle, 1972, Pop. Sydney, S.A. pp. 81–88.
8. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. — М.: Химия, 1976. — 416 с.
9. Макаров В. Н., Горшкова В. А., Волежанин В. А. Математическое моделирование активного управления аэродинамикой шахтных центробежных вентиляторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 4. — С. 39–45.
10. Макаров В. Н., Макаров В. Н. Патент 260 14 95. Россия, М. кл. В64С 23/0,6. Способ создания подъемной силы и устройства для его осуществления, опубл.: 10.11.2016. Бюл. № 31.
11. Лойцянский И. Л. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1978. — 736 с.
12. Malmyth N. D., Marlhi V. D., Kole D. D. Studies of upper surface blown airfoils in incompressible and transuic flows. AJAA, Paper, 1980, No 18, pp. 14–16. **ПТАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Макаров Владимир Николаевич<sup>1</sup> — доктор технических наук, профессор,

Макаров Николай Владимирович<sup>1</sup> — кандидат технических наук,  
зав. кафедрой, e-mail: mnikolay84@mail.ru,

Плотников Никита Сергеевич<sup>1</sup> — начальник Бизнес-инкубатора,

Потапов Владимир Валентинович<sup>1</sup> — кандидат технических наук,  
доцент, e-mail: 2 c1@inbox.ru,

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 4, pp. 210–217.

**V.N. Makarov, N.V. Makarov, N.S. Plotnikov, V.V. Potapov**

## MATHEMATICAL MODELING OF VORTEX HYDRODEDUSTING AT MINING AND PROCESSING PLANTS

The review of the currently available methods of hydrodedusting reveals their inefficient maintenance of health conditions at mining and processing plants. It is found that high-pressure hydrodedusting increases energy spent for airing, which worsens energy efficiency of sanitation support and, as a consequence, results in the drop in the competitive power of a mine or a processing plant. The proposed method of high-pressure vortex hydrodedusting is based on the principle of the vortex inertia orthokinetic hetero-coagulation in the solid–liquid system. The mathematical model of vortex hydrodedusting is put forward, and it is shown that the value of energy required for liquid drops to completely absorb hydrophobic particles of dust is considerably decreased in case of intensive vortex of the drops. The graphical model on interaction in the contact zone at the moment of collision in the solid–liquid system is refined. It is found that the area of the liquid and dust particle contact has a direct influence on the wetting angle. The equations are derived for calculating the values of the Stokes and Reynolds criteria under vortex inertia orthokinetic hetero-coagulation and the value of the decrease in energy required for the complete absorption of dust particles as function of angular velocity of rotation of liquid drops. It is proved that the wetting area and the wetting angle have essentially higher values under the vortex kinematic coagulation. The equations to find the efficient wetting angle and the minimum diameter of absorbed dust particles as function of the angular velocity of liquid drops are derived. The essential reduction in the medium size of dispersed dust particles, the enhanced dedusting efficiency and the decrease in the water consumption under vortex hydrodedusting has been confirmed. It is found that energy saving in vortex coagulation is conditioned by the increase in the values of the Stokes and Reynolds criteria in case of rotation of liquid drops as compared with the values of these criteria calculated without regard to liquid drop rotation.

Key words: hydrodedusting, vortex inertia orthokinetic hetero-coagulation, hydrophobicity, wetting angle, kinematic coagulation.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-210-217

## AUTHORS

Makarov V.N.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Makarov N.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Head of Chair, e-mail: mnikolay84@mail.ru,

Plotnikov N.S.<sup>1</sup>, Head of Business Incubator,

Potapov V.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: 2 c1@inbox.ru,

<sup>1</sup> Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

## REFERENCES

1. Ksenofontova A. I., Burchakov A. S. *Teoriya i praktika bor'by s pyl'yu v ugol'nykh shakhtakh* (Theory and practice of dust control in coal mines), Moscow, Nedra, 1965, 232 p.

2. Saranchuk V. I., Kachan V. P., Rekun V. V. *Fiziko-khimicheskie osnovy gidroobespylivaeniya i preduprezhdeniya vzryvov ugol'noy pyli* (Basic physics and chemistry of hydrodedusting and prevention of coal dust explosions), Kiev, Naukova dumka, 1984, 216 p.

3. Makarov V.N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N.V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block (SCOPUS) *Refractations and Industrial Ceramics*. 2017. Vol. 38. No 3. pp. 288–292.

4. Yanov A. P., Vashchenko V. S., Gagauz F. G. *Bor'ba s pyl'yu i vrednymi gazami v zheleznorudnykh shakhtakh* (Dust and toxic gas control in iron ore mines), Moscow, Nedra, 1984, 228 p.

5. Zhuravlev V.P., Saranchuk V.I., Strakhov I.A. *Modelirovanie i proektirovanie sistem gidroobe-spylivaniya* (Modeling and design of hydrodedusting systems), Kiev, Naukova dumka, 1990, 132 p.

6. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkerev Yu. A. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2007, no 10, pp. 1–24.

7. Owyer F. B., Thompson R. L. Ore sorting. *Develop and Innosot. Aust. Process Ind. Aust. Chem. Eg. Conf.*, Newcastle, 1972, Pop. Sudney, S.A. pp. 81–88.

8. Zimon A.D. *Adgeziya zhidkosti i smachivanie* (Liquid adhesion and wetting), Moscow, Khimia, 1976, 416 p.

9. Makarov V.N., Gorshkova V.A., Volegzhanin V.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 4, pp. 39–45.

10. Makarov N.V., Makarov V.N. *Patent RU 260 14 95*, 10.11.2016.

11. Loytsyanskiy I.L. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Fluid and gas mechanics), Moscow, Nauka, 1978, 736 p.

12. Malmyth N. D., Marlhi V. D., Kole D. D. Studies of upper surface blown airfoils in jucompressible and transuic flows. *AJAA, Paper*, 1980, No 18, pp. 14–16.

## FIGURES

Fig. 1. Graphical model of vortex kinematic coagulation of dust particle and liquid drop: classical inertia orthokinetic hetero-coagulation, vortex inertia orthokinetic hetero-coagulation.

Fig. 2. Contour lines of angular rotation velocity of water drop as function of critical values of the Stokes and Reynolds criteria.



---

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

## КОМПЛЕКСЫ ГОРНЫХ МАШИН ДЛЯ ДОБЫЧИ БИОТОПЛИВА НА ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

(№ 1118/04–18, 1120/04–18, 1121/04–18, 1122/04–18 от 12.02.2018; 7 с.)

Зюзин Борис Федорович<sup>1</sup> – доктор технических наук, профессор, e-mail: zbfu@yandex.ru,

Жигульская Александра Ивановна<sup>1</sup> – кандидат технических наук, доцент,

Жигульский Максим Александрович<sup>1</sup> – старший преподаватель, e-mail: hfr.drow@gmail.com,

Оганесян А.С.<sup>1</sup> – магистрант, e-mail: ttmo@mail.ru,

<sup>1</sup> Тверской государственный технический университет.

В современных условиях функционирования торфяной отрасли горной промышленности необходимо создание комплексов машин в соответствии с перспективными технологиями добычи торфяного биотоплива: фрезерного торфа, кускового торфа, торфяные брикеты, пеллеты и гранул.

Ключевые слова: горные машины, комплексы машин, торфяные месторождения, биотопливо.

## COMPLEXES OF MOUNTAIN MACHINES FOR BOOTY OF BIOFUEL ON PEAT DEPOSITS

Zyuzin B.F.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: zbfu@yandex.ru,

Zhigul'skaya A.I.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: 9051963@gmail.com,

Zhigul'skiy M.A.<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: hfr.drow@gmail.com,

Oganesyan A.S.<sup>1</sup>, Master's Degree Student, e-mail: ttmo@mail.ru,

<sup>1</sup> Tver State Technical University, 170026, Tver, Russia.

In modern conditions of functioning of the peat mining industry requires the creation of machines in accordance with the perspective technologies of production of biofuel peat: milled peat, sod peat, peat briquettes, pellets and granules.

Key words: mining machines, complexes of machines, peat deposits, biofuel.