

Д. т. н. В. Н. Макаров, д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), к. т. н. Н. В. Макаров

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

УДК 621.982.622.273,622.44

ГЕНЕЗИС ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЫЛЕОБРАЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Предложена математическая модель вихревого гидрообеспыливания. Получены уравнения для расчета величины снижения потребной энергии полного поглощения частиц пыли, эффективного краевого угла смачивания и минимального диаметра поглощаемых частиц пыли. Показано, что вихревое гидрообеспыливание существенно снижает размер диспергированного состава пыли, расход воды, повышая эффективность пылеподавления.

Ключевые слова: экотехнология в индустрии строительных материалов, пылеподавление, коагуляция, гидрофобность, циркуляция, краевой угол смачивания.

Анализ основных этапов развития техники и технологии пылеподавления в индустрии строительных материалов показал их недостаточную эффективность в обеспечении санитарно-гигиенических условий. Пыль, образующаяся на предприятиях строительной индустрии, весьма разнообразна по свойствам, химическому и дисперсному составу. Пыль песка, каолина, глины, доломита, известняка наиболее широко применяются в производстве строительных материалов. Например, песок является сырьевым материалом силикатного и глиняного кирпича, стеклянного и минерального волокна, а также входит в состав керамических изделий [1–3]. Метаморфические породы (гнейс, кварцит, талькомагнезит) используют в производстве огнеупорных материалов. Следует отметить силикозоопасность пыли метаморфических пород, так как наличие свободного SiO_2 в кварцевой пыли достигает 70–85 %.

Производственная пыль — одна из наиболее распространенных профессиональных вредностей, которая может вызывать пылевые заболевания, занимающие первое место в мире среди профессиональных заболеваний. Опасность легочных заболеваний возрастает с увеличением содержания в пылевом аэрозоле свободного SiO_2 . Пыль асбеста квалифицирована как канцерогенное вещество, любая ее доза способна стать причиной заболевания. Наибольшим фиброгенным действием обладают пылевые частицы, содержащие свободный SiO_2 . Весьма опасна

для здоровья пыль кварца, кристобалита и тридимита, образующаяся при производстве стекла и диносовых изделий, содержащая выше 90 % свободного SiO_2 .

Существенное влияние на эффективность пылеподавления в технологических процессах подготовки компонентов исходного сырья для производства строительных материалов оказывают плотность орошения и удельный расход воды. При этом низконапорное орошение не улавливает мелкие фракции пыли, являющиеся причиной заболевания силикозом [1–3]. Эффект пылеподавления в существенной мере сводится к преодолению энергетического барьера в ходе активных столкновений и переводу системы твердое – жидкое в более устойчивое состояние, т. е. определяется степенью коагуляции и способностью капель жидкости захватывать частицы пыли [4–6]. При высоконапорном гидрообеспыливании существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов обеспечения санитарно-гигиенических условий и, как результат, приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в индустрии строительных материалов [2–4].

Актуальность задачи совершенствования технологии высоконапорного гидрообеспыливания, как составной части программы внедрения экологического недропользования, требует нового подхода к построению графоаналитической модели инерционной ортокINETической гетерокоагуляции водно-пылевого аэрозоля [4, 5]. Определяющую роль в увеличении эффективности коагуляционного взаимодействия капель воды и частиц пыли играет именно кинетическая энергия движения капель распыляемой воды, а не общий ее расход. Для низконапорного распыления жидкости влияние начального участка факела на общую эффективность коагуляции не



С. Я. Давыдов

E-mail: davidovtrans@mail.ru

столь существенно из-за малой кинетической энергии диспергируемой струи. Динамически активный начальный участок с высокой кинетической энергией капель жидкости при высоконапорном гидрообеспыливании играет определяющую роль в общей эффективности захвата и коагуляции пылевых частиц каплями воды [6, 7].

Пылеподавление фактически возможно только при непосредственном контакте капли жидкости с частицей пыли. Механизм именно этого процесса необходимо изучить, чтобы разработать технологию и соответствующие технические средства.

Технически коагуляция представляет собой результат столкновения двух фаз: жидкой и твердой. Соударение происходит при контакте капли жидкости и частицы пыли, при этом сам факт коагуляции, т. е. поглощения пыли жидкостью, может и не наступить, так как для окончательного захвата и перехода в единую систему капля жидкости – частица пыли необходимо, чтобы силы инерции частиц пыли были больше сил адгезии и смачивания. При кинетическом столкновении в системе твердое – жидкое необходимо разделять понятия эффективность столкновения (как вероятность достижения частицей пыли поверхности капли жидкости при соответствующих граничных условиях) – коэффициент захвата и эффективность коагуляции (как вероятность необратимой фиксации частицы каплей) – коэффициент коагуляции.

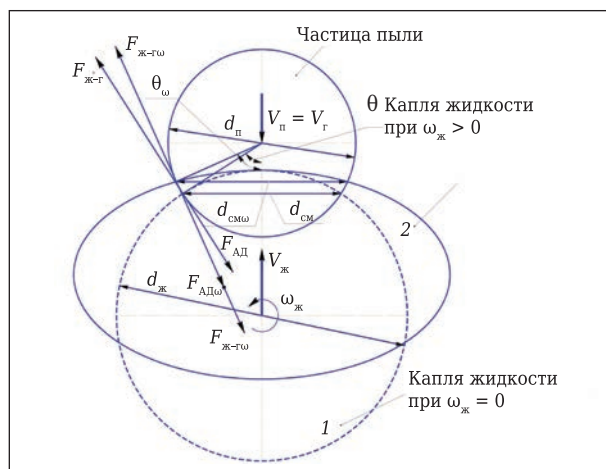


Рис. 1. Графическая модель вихревой кинематической коагуляции частицы пыли каплей жидкости: 1 — модель классической инерционной ортокинети́ческой гетерокоагуляции (при $\omega_{ж} = 0$); 2 — вихревая инерционная ортокинети́ческая гетерокоагуляция, $\omega_{ж} > 0$, где $\omega_{ж}$ — угловая скорость вращения капли жидкости относительно скорости $V_{ж}$ и сила депрессии в зоне контакта, обусловленная вращением капли жидкости при $\omega_{ж} = 0$ и $\omega_{ж} > 0$ соответственно; $F_{ад}$, $F_{ад\omega}$ — сила адгезии при $\omega_{ж} = 0$ и $\omega_{ж} > 0$ соответственно; $d_{п}$, $d_{ж}$ — диаметр частицы пыли и капли жидкости соответственно; $d_{см}$, $d_{см\omega}$ — диаметр периметра смачивания при $\omega_{ж} = 0$ и $\omega_{ж} > 0$ соответственно; θ , θ_{ω} — краевой угол смачивания при $\omega_{ж} = 0$ и $\omega_{ж} > 0$ соответственно

Степень взаимного проникновения двух фаз, т. е. эффективность коагуляции (особенно применительно к частицам микроразмера, соответствующим гидрофобности), зависит от характера протекания поверхностных явлений в зоне их контакта, обусловленного влиянием относительной скорости капли воды и частицы пыли, их размера, поверхностного натяжения на границе раздела. Экспериментально установлено [7, 8], что частицы пыли диаметром менее $5 \cdot 10^{-6}$ м практически гидрофобны. При этом в структуре пыли на промышленных объектах преобладают частицы размером $(1,5 \div 250) \cdot 10^{-6}$ м. Таким образом, значительная часть наиболее вредной для организма человека пылевой взвеси не способна к эффективному смачиванию (из-за малых размеров гидрофобна), что существенно снижает эффективность систем высоконапорного гидродинамического пылеподавления.

Цель моделирования кинематических и динамических параметров системы капля жидкости – частица пыли в процессе предлагаемой вихревой инерционной ортокинети́ческой гетерокоагуляции — исследование механизма кинематической коагуляции в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращающейся каплей жидкости [9, 10]. Математическая модель вихревой кинематической коагуляции, использующей этот принцип, является основой подготовки рекомендаций по совершенствованию технологического оборудования динамического высоконапорного гидрообеспыливания, созданию энергоэффективных вихревых форсунок для установок пылеподавления.

Фиксация частиц, приблизившихся к капле на расстояние действия адгезионных сил, зависит от величины краевого угла смачивания θ . Для захвата гидрофобных частиц пыли каплями жидкости необходимо совершить работу внешних инерционных сил, которая соответствует кинетической энергии W_k взаимодействия в процессе их контакта. Захват частицы пыли каплей жидкости произойдет при условии, когда ее W_k будет больше или равна энергии поглощения, соответствующей сумме энергии адгезии $W_{ад}$ ($F_{ад}$ — сила адгезии) (рис. 1), определяемой удельной энергией отрыва, и энергии смачивания $W_{ж-г}$ ($F_{ж-г}$ — сила поверхностного натяжения), определяемой удельной энергией растекания [6, 7].

С учетом изложенного условия, выразив массу частицы пыли, принимая ее в форме шара, через диаметр $d_{п}$, выражение для минимального диаметра частицы пыли, поглощаемой каплей жидкости, $d_{п\min}$, м, получим в виде:

$$d_{п\min} = 24 \frac{\delta_{ж-г} \cos \theta}{(\rho_{п} - \rho_{г})(V_{ж} - V_{г})^2}, \quad (1)$$

где $\rho_{п}$, $\rho_{г}$ — плотность частицы пыли и газа соответственно, кг/м³; $V_{ж}$, $V_{г}$, $V_{п}$ — скорость капли

жидкости, скорость газа и скорость частицы пыли соответственно, $V_r = V_n$, м/с; $\delta_{ж-г}$ — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред жидкость – газ», Дж/м²; θ — краевой угол смачивания на границе раздела двух сред жидкость – газ, рад.

На базе известной графической модели кинетической коагуляции частицы пыли капель жидкости (при угловой скорости вращения капли жидкости относительно $V_{ж\omega_j} = 0$ [5]) построена модель вихревой кинематической коагуляции, при которой капля жидкости вращается с ω_j , индуцируя в зоне контакта присоединенный вихрь [8].

На рис. 1 показана графическая модель взаимодействия в зоне контакта в момент соударения в системе твердое – жидкое. Площадь контакта капли жидкости с частицей пыли, определяемая диаметром периметра смачивания $d_{см}$, оказывает непосредственное влияние на θ . Чем меньше радиус кривизны поверхности капли в зоне контакта, т. е. меньше ее размер, тем меньше θ , и, следовательно, тем больше потребуется затратить энергии для полного поглощения частицы пыли с $d_{п, мин}$ каплей жидкости, определяемой поверхностной энергией отрыва и растекания.

Размер капли не является решающим условием, так как при одинаковых объемах две капли могут иметь разные формы, определяемые, в частности, ω_j и, соответственно, диаметром $d_{см}$ и $d_{см\omega}$.

Рассмотрен механизм целенаправленного управления θ и W_k . С ростом θ величина энергии поглощения снижается, что позволяет обеспечить заданный уровень эффективности обеспыливания при меньших энергозатратах или расширить диапазон поглощения частиц пыли меньшего размера, т. е. повысить эффективность пылеподавления при заданных энергозатратах.

При соударении частицы пыли с вращающейся со скоростью ω_j каплей жидкости диаметр периметра смачивания увеличивается до $d_{см\omega}$ по сравнению с $d_{см}$, т. е. при классической гетерокоагуляции (см. рис. 1). Чем больше θ , тем меньше W_k , требуемая для поглощения частицы пыли, т. е. чем больше площадь контакта капли жидкости с частицей пыли, тем меньшую скорость необходимо сообщать каплям жидкости для обеспечения эффективного пылеподавления.

Критериями подобия, определяющими идентичность кинематических, инерционных и аэродинамических явлений коагуляции, т. е. переход системы частицы пыли в капле жидкости в устойчивое энергетическое состояние, являются инерционные критерии Стокса St и Рейнольдса Re , характеризующие соотношение сил инерции и вязкости в трехфазной среде жидкое – твердое – газообразное [7]. В работе [7] экспериментально установлено существование аэродинамического энергетического барьера, препятствующего переходу системы жидкое – твердое на более высокий энергетический уровень коагуляцион-

ного взаимодействия при низких значениях W_k , что соответствует критическим значениям St , при которых невозможен захват частиц пыли [6].

Для снижения энергоемкости высоконапорного гидродинамического пылеподавления необходимо изменить кинематику взаимодействия капль жидкости и частиц пыли в зоне контакта. Это возможно за счет влияния энергии вихря, обусловленной вращением капли жидкости со скоростью ω_j вокруг ее оси, совпадающей с вектором скорости $V_{ж}$.

Влияние кинематических и динамических параметров вращения капли жидкости на аэродинамический поверхностно-адгезионный энергетический барьер и θ показано на графической модели вихревой инерционной оптокинетической гетерокоагуляции при взаимодействии частицы пыли с вращающейся с ω_j каплей жидкости (см. рис. 1). При вращении капли жидкости с ω_j вокруг ее поверхности и в зоне контакта согласно условию Гельмгольца – Бернулли создается область разрежения, т. е. пониженного статического давления на величину удельной энергии ΔW_k присоединенного вихря, скорость которого согласно гидродинамической аналогии определяется по известной в теории электродинамики формуле Био – Саварра. Присоединенный вихрь, обусловленный вращением капли жидкости, снижая статическое давление в зоне ее контакта с частицей пыли, увеличивает θ до величины θ_ω , соответствующей θ при $\omega_j > 0$, что способствует снижению аэродинамического энергетического барьера [12].

В зоне контакта частица пыли будет двигаться по винтовой линии с углом спирали $\alpha = \arctg \frac{d_n \sin \theta \omega_j}{V_{ж} - V_r}$, в глубь капли жидкости с поступательной скоростью $V_{ж} - V_r$, вращаясь при этом с ω_j .

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

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

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

где $\rho_{ж}$ — плотность капли жидкости, кг/м³; μ_r — коэффициент динамической вязкости газа.

Таким образом, вращательное движение капли жидкости увеличивает фактическое эффективное значение St_ω и $Re_{ж}$ в зоне контакта, способствуя снижению величины поверхностно-адгезионного энергетического барьера и критического уровня аэродинамического энергетического барьера [5].

Снижение потребной энергии для полного поглощения частицы пыли вращающейся каплей жидкости, равное потенциальной энергии разрежения $\Delta P_{ж-г\omega}$, т. е. работе силы депрессии в зоне контакта на длине частицы пыли, равной ее диаметру, можно выразить уравнением:

$$\Delta P_{ж-г\omega} = \Delta F_{ж-г\omega} d_{п} = \frac{1}{2} \rho_{ж} \Gamma_{\omega} \omega_{ж} S_K S_{п}^{-1}, \quad (3)$$

где Γ_{ω} — циркуляция газа в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, м²/с; S_K — площадь контакта, соответствующая площади смачивания, м²; $S_{п}$ — площадь поверхности частицы пыли, м²; $\Delta F_{ж-г\omega}$ — сила давления разрежения (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 $\Delta W_{к\omega}$, снижающей аэродинамический барьер поглощения, т. е. фактически уменьшающей потребную кинетическую энергию, равной энергии вихря, присоединенного к вращающейся капле жидкости, с учетом (3) и рис. 1, уравнений Бернулли и Остроградского – Гаусса [10] получим в виде:

$$\Delta W_{к\omega} = -\Delta P_{ж-г\omega} = \frac{\pi}{8} \rho_{ж} d_{п}^3 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) уравнение для силы депрессии в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленной влиянием присоединенного вихря и равной снижению силы поверхностного натяжения, получим в виде:

$$\Delta F_{ж-г\omega} = \frac{\pi}{32} \rho_{ж} d_{п}^4 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2. \quad (5)$$

Для вихревой инерционной ортокинетики гетерокоагуляции минимальное значение энергии для полного поглощения с учетом уравнений (4) по аналогии с гетерокоагуляцией при $\omega_{ж} = 0$ запишем в виде [5]:

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

где θ_{ω} — краевой угол смачивания при $\omega_{ж} > 0$ рад.

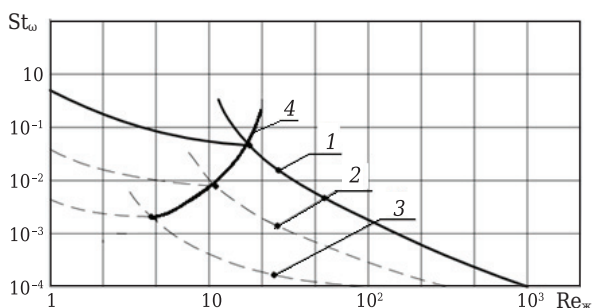


Рис. 2. Изолинии угловой скорости вращения капли воды в функции от критических значений St_{ω} и $Re_{ж}$: 1 — $\omega_{ж} = 0$, $d_{п \min} = 6 \cdot 10^{-6}$ м; 2 — $\omega_{ж} = 1,5 \cdot 10^2$ с⁻¹, $d_{п \min} = 3,5 \cdot 10^{-6}$ м; 3 — $\omega_{ж} = 3 \cdot 10^2$ с⁻¹, $d_{п \min} = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м; 4 — зависимость критического значения критерия Стокса от угловой скорости вращения капли

С учетом уравнений (4), (6) уравнение для краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы при вращении капли жидкости с $\omega_{ж}$ получим в виде:

$$\theta_{\omega} = \arccos \left(\cos \theta + \frac{\pi \rho_{ж} d_{п}^3 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2}{8 \delta_{ж-г} \cos \theta} \right). \quad (7)$$

С учетом (1) и (7) по предложенной модели инерционной ортокинетики гетерокоагуляции системы частица пыли – капля жидкости при вращении частицы жидкости с $\omega_{ж}$ минимальный диаметр $d_{п \omega \min}$ частицы пыли, полностью поглощаемой в процессе захвата и смачивания каплями жидкости при действии сил поверхностного натяжения, инерционных сил поступательного и вращательного движения получим в виде:

$$d_{п \omega \min} = \frac{\delta_{ж-г} \cos \arccos \left(\cos \theta + \frac{\pi \rho_{ж} d_{п}^3 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2}{8 \delta_{ж-г} \cos \theta} \right)}{(\rho_{п} - \rho_{г}) (V_{ж-г} - V_r)^2}. \quad (8)$$

На рис. 2 показаны результаты расчета по предложенной математической модели вихревой кинематической коагуляции изменения критических значений критерия Стокса в зависимости от $\omega_{ж}$ капель воды диаметром $d_{ж} = 6 \cdot 10^{-6}$ м для абсолютно гидрофобных частиц SiO_2 .

Приведенные изолинии $\omega_{ж}$ подтверждают существенное снижение как запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц, так и критического уровня аэродинамического энергетического барьера.

При $\omega_{ж} = 3 \cdot 10^2$ с⁻¹ критическое значение St_{ω} снижается более чем в 4 раза, а критическое значение $Re_{ж}$ более чем в 3 раза по сравнению с их значениями в условиях поступательного движения капель жидкости (при $\omega_{ж} = 0$). При этом значения критериев, полученные по формуле (2), на линии 4 (см. рис. 2) равны их критическим значениям полного поглощения частицы пыли каплей жидкости при $\omega_{ж} = 0$, т. е. полученным по известным критериальным уравнениям в условиях классической гетерокоагуляции (точка пересечения линий 4 и 1, см. рис. 2).

Снижение энергетических барьеров в условиях вихревой коагуляции обусловлено увеличением значений St_{ω} и $Re_{ж}$ при вращении капли жидкости по сравнению с их значениями, рассчитанными без учета вращения капли жидкости (при $\omega_{ж} = 0$).

Снижение величины $Re_{ж}$ для капель жидкости при вихревом высоконапорном гидрообеспыливании соответствует уменьшению ее расхода и потребного давления, т. е. повышению ресурса эффективности системы пылеподавления. При вихревом инерционном ортокинетики гетерокоагуляционном взаимодействии вращающихся капель жидкости и несмачиваемых частиц пыли коэффициент захвата η_{st}

будет равен коэффициенту коагуляции η_k при существенно меньших значениях $Re_{ж}$, т. е. при меньших скоростях поступательного движения капли жидкости, либо меньших размерах частицы пыли.

Экспериментальные исследования с достаточной точностью подтвердили результаты расчетов по предложенной математической модели, показали высокую эффективность вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции, позволившей на 20 % снизить расход воды, уменьшить минимальный размер поглощения абсолютно гидрофобных частиц пыли до $1,5 \cdot 10^{-6}$ м в сравнении с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вращение капли жидкости снижает расклинивающее действие газовой среды на границе твердое – жидкое, т. е. снижает величину потребной энергии полного поглощения и увеличивает

поверхность смачивания, а также в процессе вихревой инерционной ортокинетической коагуляции увеличивает фактическое эффективное значение критериев Стокса и Рейнольдса в зоне контакта, способствуя снижению их критических значений. Вихревое высоконапорное гидрообеспыливание способствует увеличению θ , снижению минимального размера абсолютной гидрофобности частиц пыли, уменьшению запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц и критического уровня аэродинамического энергетического барьера, а также позволяет уменьшить минимальный размер поглощения абсолютно гидрофобных частиц пыли до $1,5 \cdot 10^{-6}$ м, т. е. существенно уменьшить размер диспергированного состава частиц пыли, повышая эффективность пылеулавливания. Вихревая кинематическая коагуляция позволяет на 20 % снизить расход воды по сравнению с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.

Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Пылеобразование и решения по пылеулавливанию при обработке полезных ископаемых в карьерах / С. Я. Давыдов, С. В. Белов, Т. Н. Черемисина // Новые огнеупоры. — 2016. — № 5. — С. 14–18.
2. **Davydov, S. Ya.** Dust formation and a solution for dust collection during economic mineral processing in quarries / S. Ya. Davydov, S. V. Belov, T. N. Cheremisina // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 234–238.
3. **Давыдов, С. Я.** Вращающиеся печи предприятий строительных материалов : уч. пособие / С. Я. Давыдов, В. А. Пьячев, И. Д. Кащеев [и др.]. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. — 352 с.
4. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта: вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследование, производство / С. Я. Давыдов, А. Н. Сёмин. — М. : Фонд «Кадровый резерв», 2016. — 472 с.
5. **Макаров, В. Н.** Теоретические основы эффективности вентиляции в технологических процессах стройиндустрии / В. Н. Макаров, С. Я. Давыдов // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 59–63.
6. **Makarov, V. N.** Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises / V. N. Makarov, S. Ya. Davydov // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 103–106.
7. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.

8. **Журавлев, В. П.** Моделирование и проектирование систем гидрообеспыливания / В. П. Журавлев, В. И. Саранчук, И. А. Страхов [и др.]. — Киев : Наукова думка, 1990. — 132 с.
9. **Фролов, А. В.** Основы гидрообеспыливания / А. В. Фролов, В. А. Телегин, Ю. А. Сечкерев // Безопасность жизнедеятельности. — 2007. — № 10. — С. 1–24.
10. **Саранчук, В. И.** Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли / В. И. Саранчук, В. П. Качан, В. В. Рекун [и др.]. — Киев : Наукова думка, 1984. — 216 с.
11. **Зимон, А. Д.** Адгезия жидкости и смачивания / А. Д. Зимон. — М. : Химия, 1976. — 416 с.
12. **Макаров, В. Н.** Математическое моделирование активного управления аэродинамикой шахтных центробежных вентиляторов / В. Н. Макаров, В. А. Горшкова, В. А. Волежжанин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 4. — С. 39–45.
13. **Пат. 2601495 Российская Федерация.** Способ создания подъемной силы и устройства для его осуществления / Макаров В. Н., Макаров В. Н. ; заявл. 22.06.15 ; опубл. 10.11.16, Бюл. № 31.
14. **Лойцянский, И. Л.** Механика жидкости и газа / И. Л. Лойцянский. — М. : Наука, 1978. — 736 с. ■

Получено 30.03.18

© В. Н. Макаров, С. Я. Давыдов,
Н. В. Макаров, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Ceramitec 2021

Technologies · Innovations · Materials

■ 16–19 ноября 2021 г.

■ г. Мюнхен, Германия



Hot spot for the ceramics industry

www.ceramitec.com