УДК 621.921
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.505-515

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПАУНД-ПРОТЕКТОРА НА АБРАЗИВ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ ДЛЯ ПОДВОДНОГО ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

© Г. В. Барсуков[1] ✉, К. Ю. Фроленков[1], А. С. Фетисов[1], В. В. Власов[1], А. В. Петрухин[1]

[1] *Научно-исследовательская лаборатория «Новые абразивные материалы», awj@list.ru; ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», Орел, Российская Федерация*

Ключевые слова: абразив; гидроабразивное резание; инкапсуляция; компаунд-протектор; псевдоожиженный слой.

Аннотация: Представлены результаты моделирования влиянии физических свойств абразивных частиц на скорость воздушного потока, обеспечивающего их псевдоожижение для нанесения полимерного компаунд-протектора для подводного гидроабразивного резания, а также результаты математического моделирования процесса разгона абразивных частиц в псевдоожиженном слое на основе решения полученных уравнений движения. Проведен анализ методов математического моделирования, применимых для описания процесса псевдоожижения сыпучих материалов.

Введение

Эффективность технологии гидроабразивного резания во многом зависит от используемого абразивного материала, который смешивается со струей воды в сопле и подается в зону взаимодействия с обрабатываемым материалом. Абразив играет ключевую роль в этом методе обработки, оказывая значительное влияние на конечный результат: качество реза, скорость процесса, максимальную толщину прорезаемого материала и долговечность фокусирующей трубки сопла [1, 2]. Наиболее распространенным абразивом, используемым на практике, традиционно является гранатовый песок.

Проблема износа сопла представляет собой существенное затруднение при проведении гидроабразивной резки, особенно в подводных условиях [3]. Это обстоятельство диктует необходимость его периодической замены, обычно каждые 50…100 ч эксплуатации в тяжелых условиях. Еще одним недостатком является то, что замена изношенных компонентов сопла требует временной остановки процесса резки, после чего возобновление работы происходит с точки, где процесс был прерван.

Ввиду вышеизложенного, исследования, нацеленные на модернизацию абразивного материала, используемого для подводной гидроабразивной резки, представляются актуальными с точки зрения как науки, так и практики, поскольку они способствуют увеличению срока службы конструктивных частей оборудования. Авторами данной публикации предлагается создать новый абразив, оснащенный полимерной защитной оболочкой (покрытием) – компаунд-протектором, нанесен-

ной на поверхность каждого абразивного зерна, которая призвана минимизировать негативное воздействие абразивных частиц на внутренние поверхности систем подводной гидроабразивной установки [4, 5]. Для нанесения покрытия на абразив может применяться разнообразное оборудование. Среди наиболее часто используемых в различных отраслях промышленности конструкций можно выделить установки с чашечным (вращающимся) типом действия и системы, работающие на основе псевдоожиженного слоя. Последние, обеспечивают более высокое качество нанесения покрытий и повышенную производительность сушки. Псевдоожиженный слой по методу Вурстера является наиболее распространенным типом оборудования для формирования пленочных покрытий на частицах мелкого размера [6, 7].

В установке типа колонны Вурстера предусмотрена цилиндрическая трубка *1*, размещенная внутри камеры с псевдоожиженным слоем *2* (рис. 1). Пространство между трубкой *1* и нижней перфорированной пластиной *3* регулирует поток воздуха *4*, направляемый как внутрь трубки *1*, так и в основную камеру *2*. Воздух, движущийся через внутреннюю трубку, имеет большую скорость по сравнению с потоком в главной части камеры. В процессе нанесения покрытия, под действием восходящего потока воздуха, твердые частицы перемещаются внутри этой цилиндрической трубки.

Процесс нанесения покрытия на частицы происходит в пределах цилиндрической трубки. Полимерное покрытие подается распылительной головкой, расположенной по центру распределительной пластины. Частицы, высыхая, поднимаются в верхнюю, фонтанирующую зону, где их скорость снижается, и они опускаются к стенкам камеры. После этого они вновь подхватываются потоком воздуха через зазор между трубкой и пластиной и возвращаются в зону распыления. Данный цикл движения твердых частиц продолжается до достижения требуемой толщины покрытия.

Однако движение частиц в псевдоожиженном слое при распылении является сложным процессом, включающим столкновения между частицами, теплообмен и сушку, а также другие процессы [8], которые могут привести к неравномерности покрытия и агломерации [9]. Таким образом, распределение частиц по времени пребывания в зоне обработки и распределение частиц по времени цикла являются важными параметрами для достижения требуемых характеристик роста покрытия на частицах. Для обеспечения эффективности процесса псведоожижения многими авторами проведены исследования свойств частиц и покрытий.

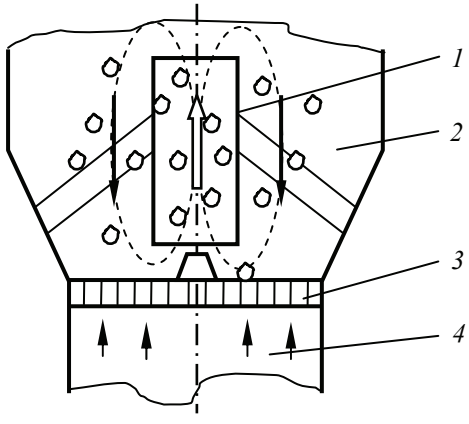

Рис. 1. Схема колонны Вурстера

Авторы работ [10, 11] изучали процессы нанесения покрытий с использованием органических растворов и растворов неорганических солей. Они обнаружили, что скорость псевдоожижения является наиболее значимым фактором, влияющим на стабильность цикла частиц и кинетику роста. При недостаточной скорости воздушного потока частицы концентрируются в нижней части псевдоожиженного слоя, что приводит к их плохому распределению, более длительному времени высыхания капель, неоднородному росту частиц и агломерации.

Изучение процессов, связанных с формированием полимерного покрытия на абразивных частицах, а также особенностей его структуры и механизмов роста остается актуальной и недостаточно исследованной областью.

Цель работы – анализ методов математического моделирования, применяемых для описания процесса псевдоожижения сыпучих материалов.

В рамках исследования получены данные о влиянии физических свойств абразивных частиц на скорость воздушного потока, обеспечивающего их псевдоожижение, и представлены результаты компьютерного моделирования этих зависимостей.

Статистическое моделирование псевдоожиженного слоя

Воздушный поток в активной зоне является турбулентным. Турбулизации способствуют как сетка, через которую закачивается воздух, так и твердые частицы, образующие твердую фазу псевдоожиженного слоя [12]. Турбулентность воздушного потока приводит к случайности движения как твердых, так и жидких частиц. При этом скорости твердых, жидких и газообразных частиц не совпадают между собой. Это является причиной столкновения жидких и твердых частиц, которое необходимо для нанесения на последние покрытия. Математическое описание процессов движения всех сред осуществляется, в зависимости от решаемых задач, на основании целого набора различных моделей. Этому посвящено много работ, например [13, 14].

Один из подходов использует аналогию движения частиц твердой и распыляемой фаз со случайным тепловым движением молекул газа. Такое движение описывается кинетической теорией газов [15]. Базовым является кинетическое уравнение для функции распределения частиц среды по их положениям в фазовом пространстве – объединении геометрического пространства и пространства скоростей.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{c} \cdot \nabla_{\vec{r}} + \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{c}} \right) f(\vec{r}, \vec{c}, t) = J , \qquad (1)$$

где t – время; $\vec{r} = \vec{r}(t)$ – радиус-вектор материальной точки, моделирующей движущуюся частицу, в момент времени t; $\vec{c} = d\vec{r}/dt$, $\vec{a} = d\vec{c}/dt$ – ее скорость и ускорение в этот момент; $\nabla_{\vec{r}} \equiv d/d\vec{r}$ – дифференциальный оператор Гамильтона по аргументу $\vec{r}$, $\nabla_{\vec{c}} \equiv d/d\vec{c}$ – по аргументу $\vec{c}$; J – столкновительный член уравнения; $f(\vec{r}, \vec{c}, t)$ – функция плотности распределения частиц; $(\cdot)$ – знак свертки – скалярного умножения.

Уравнение (1) является балансовым. Оно характеризует скорость изменения числа частиц n в единице объема $d\Gamma$ фазового пространства в окрестности точки $(\vec{c}, \vec{r}) \in \Gamma$, произошедшее из-за парных и тройных столкновений материальных частиц, составляющих рассматриваемую среду.

Целью статистического подхода является получение функции плотности распределения частиц $f(\vec{r},\vec{c},t)$ по скоростям и координатам в шестимерном фазовом пространстве, образованном этими векторными величинами. Знание этой функции дает возможность описать осредненные движения твердых и жидких частиц, определить вероятность их столкновений. Частным случаем статистического подхода является ситуация, когда столкновительным членом можно пренебречь, а интерес представляет только распределение частиц по скоростям. В этом случае в качестве $f(\vec{r},\vec{c},t)$ используется распределение Максвелла

$$f(\vec{c}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{m}{2kT}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{mc^2}{2kT}\right), \tag{2}$$

где k – постоянная Больцмана; T – аналог температуры дискретной среды, вычисляемый через среднюю кинетическую энергию частиц, которая должна быть определена из других рассуждений.

Такой подход позволяет оценить средние скорости движения частиц в равновесном состоянии, ввести в рассмотрение характеристики сплошной газовой среды, моделирующей дискретную среду.

Второй подход состоит в непосредственном применении моделей, разработанных для описания различных диффузионных процессов. При этом обычно рассматривается стандартное диффузионное уравнение общего вида, решением которого является функция распределения частиц по координатам

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D\Delta\varphi, \tag{3}$$

где φ – концентрация частиц рассматриваемой среды; D – коэффициент диффузии этого вещества в окружающей среде; Δ – дифференциальный оператор Лапласа (Лапласиан).

Распределение частиц по скоростям в рамках данной модели исключается из рассмотрения. Такой подход дает возможность оценить неравномерность пространственного распределения твердой и жидкой фаз в воздушном потоке, создающем псевдоожиженный слой. В частности, изучение процесса переноса массы с помощью уравнения диффузии состоит в анализе поведения взвеси вблизи твердой поверхности, около которой значение концентрации целевого компонента отличается от концентрации в основном потоке.

Третий подход основан на использовании моделей, разработанных в классической механике сплошной среды. Здесь для каждой из сплошных сред – газа и твердой фазы – записывается группа уравнений гидромеханики, включающая среди прочих уравнения Навье–Стокса и уравнение неразрывности со своими граничными условиями. В векторном виде уравнения записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\cdot\nabla)\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}(\Delta\vec{v}) + \vec{F}; \tag{4}$$

$$\nabla\cdot(\rho\vec{v}) = 0 \tag{5}$$

(в этих выражениях использованы статистические связи между макро- и микрохарактеристиками движения исследуемой среды),
где

$$\vec{v} = \frac{1}{n}\int \vec{c}\, f(\vec{r},\vec{c},t)\, d^3\vec{c} \tag{6}$$

континуальная скорость – средняя по элементарному объему геометрического пространства; $\vec{F}$ – объемная плотность внешних сил, с учетом дискретности среды – это сумма всех внешних сил, приложенных к частицам среды, находящихся в единице ее объема.

Моделирование процесса разгона абразивных частиц в кипящем слое

С целью определения характера движения твердых частиц в псевдоожиженном слое, выявления связи толщины слоя со скоростью вдува воздуха, оценки роли каждой из сил, действующих на частицу (кроме силы столкновения), рассматривается движение одной из них в вертикальном (вдоль потока) направлении. Предварительно делается оценка величины вклада каждой из сил. Задача ставится следующим образом. Частица твердой фазы известной формы, размеров и материала лежит неподвижно (одна, без влияния соседей) на дне канала – сетке, через которую в нулевой начальный момент времени мгновенно с конечной скоростью начинает вдуваться воздух. Под его действием частица двигается вверх, достигнув определенной высоты, начинает обратное движение. Все движение надо описать. На каждую частицу, находящуюся в слое, действуют четыре силы: сила тяжести, направленная вниз; выталкивающая (архимедова) сила, направленная вверх и имеющая очень небольшое значение, ею в расчетах можно пренебречь; сила гидродинамического воздействия газового потока, направленная вверх. Первые две силы – тяжести и архимедова – не зависят от скорости потока. Третья же сила – гидродинамическая – увеличивается по мере увеличения скорости газа. Поэтому при достижении некоторой скорости сила гидродинамического воздействия станет равной силе тяжести и преодолеет четвертую силу – силу сцепления с соседними частицами. Происходит качественное изменение ситуации: частички оказываются поднятыми потоком газа, взвешенными в нем. Для рассматриваемых частиц и воздуха использовались следующие данные:

– плотность материала $\rho_{(2)} = 3{,}21 \cdot 10^3$ кг/м^3;

– радиус $r_a = 200$ мкм $= 2 \cdot 10^{-4}$ м;

– масса частиц $m = 30 \cdot 10^{-9}$ кг.

Уравнение движения отдельной частицы, не взаимодействующей с другими частицами, в рассматриваемом случае имеет следующий вид:

$$m \frac{d\vec{v}_p}{dt} = 6\pi r_a \mu (\vec{v} - \vec{v}_p) + (m - \rho V_p)\vec{g}, \qquad (7)$$

где $\vec{v}_p$ – скорость частицы; V_p – ее объем; $\vec{v}$ – скорость потока воздуха, в котором движется частица; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения; μ – динамическая вязкость воздуха, принята равной $\mu = 20 \cdot 10^{-6}$ Па$\cdot$с; ρ – плотность воздуха, $\rho = 1{,}5$ кг/м^3, первое слагаемое правой части представляет собой силу сопротивления частицы разгоняющему ее воздушному потоку (сила Стокса); второе слагаемое равно разности веса частицы и силы Архимеда.

Уравнение записано в векторной форме, так как в различных ситуациях направления движения отдельных частиц, ускорения свободного падения и воздушного потока могут быть разными.

Уравнение (7) написано для случая, когда поток воздуха разгоняет частицу. Если же этот поток тормозит ее, то вид уравнения движения частицы изменится и приобретет следующий вид:

$$m\frac{d\vec{v}_p}{dt} = 6\pi r_a \mu(\vec{v}_p - \vec{v}) + (m - \rho V_p)\vec{g}\,. \qquad (8)$$

Здесь знак первого слагаемого правой части изменился на противоположный.

Далее рассматривается движение частицы вдоль восходящего воздушного потока вверх, с помощью уравнения (7) до ее остановки, и вниз, под действием силы тяжести с помощью уравнения (8). В первом случае начальная скорость считается равной нулю, начальное положение задано в пределах насыпного слоя. Во втором случае начальная скорость также равна нулю, а начальное положение соответствует той высоте, на которую она поднялась из насыпного слоя. Оба движения одномерны. Поэтому используется скалярная форма уравнений. Для первой ситуации задача Коши имеет вид:

$$\begin{aligned} &m\frac{dv_p}{dt} + 6\pi r_a \mu v_p = 6\pi r_a \mu U - m\,g; \\ &\frac{dx_p}{dt} = v_p; \qquad (9) \\ &v_p(0) = 0; \quad x_p(0) = h_1. \end{aligned}$$

В этой системе и далее силу Архимеда для абразивных частиц не учитываем из-за ее малости по сравнению с весом частицы.

Решение системы (9) имеет следующий вид:

$$v_p = \left(U - \frac{mg}{6\pi r_a \mu}\right)\left(1 - e^{-\frac{6\pi r_a \mu}{m}t}\right); \qquad (10)$$

$$x_p = \left(U - \frac{mg}{6\pi r_a \mu}\right)\left[t - \frac{m}{6\pi r_a \mu}\left(1 - e^{-\frac{6\pi r_a \mu}{m}t}\right)\right] + h_1\,. \qquad (11)$$

Для определения требуемой скорости восходящего воздушного потока в камере установки псевдоожижения разработан программный комплекс, позволяющий вычислить ключевые рабочие параметры псевдоожижения для заданного типа и размера частиц. В качестве входных данных для расчетов использовались размеры абразивного материала, процентное содержание конкретных фракций и число псевдоожижения.

Поскольку слой абразива включает частицы различного диаметра, был вычислен их средний размер. На представленном на рис. 2 графике показана зависимость скорости воздушного потока от частиц среднего диаметра, где w_kp1 обозначает скорость начала «кипения» слоя абразивного материала. Учитывая, что для гидроабразивной резки преимущественно используется абразив с диаметром от 100 до 400 мкм, расчеты проводились именно для этих значений.

Анализ графика показывает, что для подъема частиц со средним диаметром 100 мкм требуется скорость потока порядка 0,01 м/с. Это означает, что при достижении данной скорости сопротивление слоя абразива уравнивается с весом самого слоя, частицы перестают сдавливать друг друга и слой переходит во взвешенное состояние. Для поднятия более крупных частиц, например, диаметром 400 мкм, необходима скорость потока, увеличенная до 0,05 м/с.

Кроме того, была рассчитана вторая критическая скорость, w_kp2 (скорость окончания псевдоожижения), для наименьшего диаметра частицы в выборке. Для таких частиц скорость псевдоожижения практически соответствует пределу существования взвешенного слоя, совпадая со скоростью витания самой частицы.

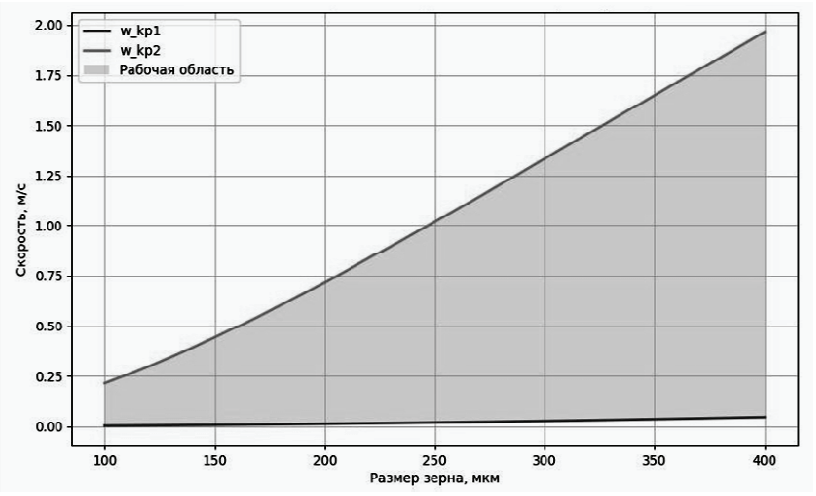

Рис. 2. Зависимость скорости псевдоожижения от среднего диаметра абразивного зерна

В рамках выполненных расчетов она составляет от 0,25 до 1,8 м/с. При превышении этой скорости псевдоожиженный слой перестает формироваться. Таким образом, проведенные расчеты позволили установить оптимальный диапазон скоростей воздушного потока для формирования псевдоожиженного слоя.

Заключение

В выражениях (9) – (11) в случае, когда $U < \dfrac{mg}{6\pi r_a \mu}$, движения частиц из насыпного слоя вверх нет. Это продолжается до тех пор, пока не будет выполняться обратное неравенство. Сказанное соответствует существующим представлениям о развитии псевдоожиженного слоя по мере роста скорости U. Состояние слоя может быть представлено в виде зависимости гидравлического сопротивления слоя Δp от скорости потока воздуха, поступающего снизу под насыпной слой (рис. 3).

По мере возрастания скорости U воздушного потока увеличивается гидравлическое сопротивление неподвижного слоя (линия *1*) или в обратном направлении (линия *2*) (см. рис. 3, *б*). Начало псевдоожижения при критической скорости воздушного потока

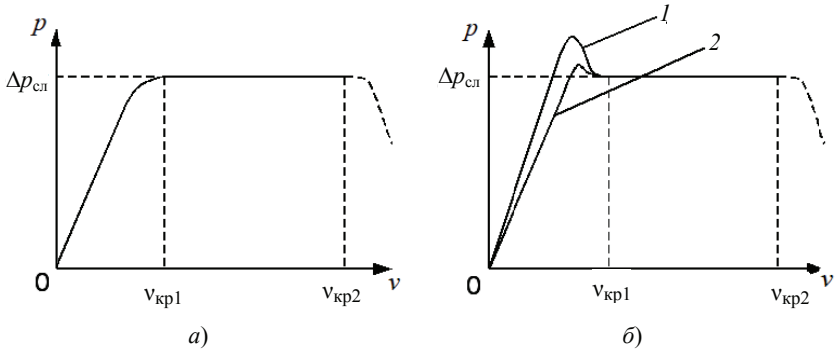

Рис. 3. Влияние скорости воздушного потока на гидравлическое сопротивление при прохождении через однородный слой твердых частиц для идеального случая (*а*) и для реальных условий (*б*)

$v_{кр} = U = \dfrac{mg}{6\pi r_a \mu}$ наступает, когда силы сопротивления равна весу частицы. Однако для создания псевдоожиженного слоя необходимо «разведение» частиц насыпного слоя друг от друга на некоторое расстояние, то есть поднять их над дном камеры. Для этого на короткий отрезок времени следует выполнить неравенство $U > \dfrac{mg}{6\pi r_a \mu}$, заставляющее частицы «витать» в пространстве камеры (небольшой бугорок на линии *1*, см. рис. 3, *б*), а затем вернуть значение U к величине $v_{кр}$, чтобы предотвратить унос частиц.

Для рассматриваемых в работе частиц абразива справедлива оценка

$$\frac{m}{6\pi r_a \mu} \approx 0{,}3c .$$

Следствием этого является, при $U > \dfrac{mg}{6\pi r_a \mu}$, обращение в ноль $\left(e^{-\frac{6\pi r_a \mu}{m}t} \approx 0\right)$ через малый отрезок времени, порядка $t \approx 1\,\text{с}$. Это то время, соответствующее «малому бугорку» линии *1* (см. рис. 3, *б*), в течение которого возникает витание абразивных частиц и создается псевдоожиженный слой.

При нанесении полимерного покрытия на абразивные частицы при одновременном отсутствии их слипания в комки важен энергетический анализ взаимных соударений частиц. Причиной соударения абразивных частиц является турбулентность потока воздуха, создающего псевдоожиженный слой. Возникающие при турбулизации глобулы воздушной массы, двигающиеся навстречу друг другу, подхватывают витающие частицы и разгоняют их, приводя к столкновению. Процесс разгона можно анализировать на основе решения уравнений (10), (11).

Работа выполнена в рамках государственного задания проект № 1024112000014-2-1.2.1;2.3.1 (FSGN-2025-0001).

Список литературы

1. Sitek, L. Abrasives and possibilities of increase in efficiency of abrasive waterjets / L. Sitek, P. Martinec // Science Journal. – 2016. – Vol. 3. – P. 877–881. doi: 10.17973/MMSJ.2016_03_201603

2. Барсуков, Г. В. Исследование абразивной способности искусственных и природных абразивов, обеспечивающих производительность гидроабразивного резания / Г. В. Барсуков, О. Г. Кожус, А. Ю. Винокуров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 2(328). – С. 34–40.

3. Mugla, D. R. Selection of Rational Technological Modes and Parameters of Underwater Waterjet Cutting / D. R. Mugla, A. L. Galinovskiy, N. V. Kobernik // In book: Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. – 2019. – P. 267–276. doi: 10.1007/978-3-319-95630-5_29

4. Жизненный цикл абразивного зерна в полимерной оболочке в процессе гидроабразивной резки / Г. В. Барсуков, В. С. Шоркин, Л. Ю. Фроленкова, О. Г. Кожус // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 6(338). – С. 72–79.

5. Obtaining the Dependences of the Contact of the Composite Abrasive Material with the Nozzle Walls, which Reduces the Wear of the Focusing Tube of the Waterjet

Installation / O. Kozhus, G. Barsukov, V. Shorkin, Yu. Stepanov // Materials Science Forum, Krasnoyarsk, Russian Federation, 20–21 November 2020. – 2021. – Vol. 1031. – P. 160–165. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.160

6. Monte Carlo simulations to determine coating uniformity in a Wurster fluidized bed coating process / Ku Zilati Ku Zhaari, P. Pandey, Y. Song, R. Turton // Powder Technology. – 2006. – Vol. 166, No. 2. – P. 81–90. doi: 10.1016/j.powtec.2006.05.001

7. Particle circulation and coating in a Wurster fluidized bed under different geometries / J. Guo, D. Liu, J. Ma, C. Liang, X. Chen // Powder Technology. – 2024. – Vol. 433. – Art. 119223. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119223

8. Simulation of a Wurster fluidized bed by CFD-DEM with a cohesive contact model / H. Li, D. Liu, J. Ma, X. Chen // Chemical Engineering Research and Design. – 2022. – Vol. 177, No. 1. – P. 157–166. doi: 10.1016/j.cherd.2021.10.038

9. Kozhus, O. The research of the Agglomeration Process During the Formation of an Abrasive-Polymer Compound for Waterjet Cutting in a Fluidized bed Installation / O. Kozhus, G. V. Barsukov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 117. – P. 2511–2518. doi: 10.1007/s00170-021-07140-0

10. Fluidized Bed Coating and Granulation: Influence of Process-Related Variables and Physicochemical Properties on the Growth Kinetics / M. Hemati, R. Cherif, K. Saleh, V. Pont // Powder Technology. – 2003. – Vol. 130, No. 1-3. – P. 18–34. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00221-8

11. Zhang, R. Novel Technique for Coating of Fine Particles Using Fluidized Bed and Aerosol Atomizer / R. Zhang, T. Hoffmann, E. Tsotsas // Processes. – 2020. – Vol. 8, No. 12. – Art. 1525. doi: 10.3390/pr8121525

12. Сеточная турбулентность в двухфазном потоке: влияние параметров несущей среды и частиц / А. И. Картушинский, Ю. А. Руди, С. В. Тислер, М. Т. Хусаинов, И. Н. Щеглов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 2. – С. 292–298. doi: 10.1134/S0018151X09020187

13. Experimental Investigation and CFD Simulation of Top Spray Fluidized Bed Coating System / S. H. Seyedin, M. Ardjmand, A. A. Safekordil, S. Raygan // Periodica Polytechnica Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 61, No. 2. – P. 117–127. doi: 10.3311/PPch.8611

14. Математическая модель псевдоожижения бинарной смеси частиц / А. В. Митрофанов, А. В. Огурцов, В. А. Магницкий, В. Е. Мизонов, K. Tannous // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 1. – С. 45–47.

15. Ферцигер, Дж. Математическая теория процессов переноса в газах : пер. с англ. / Дж. Ферцигер, Г. Капер ; под ред. Д. Н. Зубарева, А. Г. Башкирова. – Москва : Мир, 1976. – 554 с.

Modeling the Application of a Polymer Protective Compound onto Abrasive Particles in a Fluidized Bed for Underwater Abrasive Water-Jet Cutting

© G. V. Barsukov[1] ✉, K. Yu. Frolenkov[1], A. S. Fetisov[1], V. V. Vlasov[1], A. V. Petrukhin[1]

[1] *Research Laboratory New Abrasive Materials, awj@list.ru; Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russian Federation*

Keywords: abrasive; abrasive water-jet cutting; encapsulation; protective compound; fluidized bed.

Abstract: The paper presents the results of modeling the influence of abrasive particle physical properties on the air flow velocity required for fluidization during the application of a polymer protective compound intended for underwater abrasive water-jet cutting. Additionally, it presents the results of mathematical modeling regarding the acceleration of abrasive particles within the fluidized bed, based on the solution of derived equations of motion. An analysis is conducted of mathematical modeling methods applicable to describing the fluidization process of granular materials.

References

1. Sitek L., Martinec P. Abrasives and Possibilities of Increase in Efficiency of Abrasive Waterjets, *Science Journal*, 2016, vol. 3, pp. 877-881. doi: 10.17973/MMSJ.2016_03_201603

2. Barsukov G.V., Kozhus O.G., Vinokurov A.Yu. [Study of the Abrasive Capacity of Artificial and Natural Abrasives Ensuring Waterjet Cutting Performance], *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2018, no. 2(328), pp. 34-40. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Mugla D.R., Galinovskiy A.L., Kobernik N.V. Selection of Rational Technological Modes and Parameters of Underwater Waterjet Cutting, In book: *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*. ICIE 2018, 2019, pp. 267-276. doi: 10.1007/978-3-319-95630-5_29

4. Barsukov G.V., Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Kozhus O.G. [Life cycle of abrasive grain in a polymer shell during waterjet cutting], *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2019, no. 6(338), pp. 72-79. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Kozhus O., Barsukov G., Shorkin V., Stepanov Yu. Obtaining the Dependences of the Contact of the Composite Abrasive Material with the Nozzle Walls, which Reduces the Wear of the Focusing Tube of the Waterjet Installation, *Materials Science Forum*, Krasnoyarsk, Russian Federation, 20–21 November 2020, 2021, vol. 1031, pp. 160-165. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.160

6. Ku Zilati Ku Zhaari, Pandey P., Song Y., Turton R. Monte Carlo simulations to determine coating uniformity in a Wurster fluidized bed coating process, *Powder Technology*, 2006, vol. 166, no. 2, pp. 81-90. doi: 10.1016/j.powtec.2006.05.001

7. Guo J., Liu D., Ma J., Liang C., Chen X. Particle circulation and coating in a Wurster fluidized bed under different geometries, *Powder Technology*, 2024, vol. 433, art. 119223. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119223

8. Li H., Liu D., Ma J., Chen X. Simulation of a Wurster fluidized bed by CFD-DEM with a cohesive contact model, *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 177, no. 1, pp. 157-166. doi: 10.1016/j.cherd.2021.10.038

9. Kozhus O., Barsukov G.V. The research of the Agglomeration Process During the Formation of an Abrasive-Polymer Compound for Waterjet Cutting in a Fluidized bed Installation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117, pp. 2511-2518. doi: 10.1007/s00170-021-07140-0

10. Hemati M., Cherif R., Saleh K., Pont V. Fluidized Bed Coating and Granulation: Influence of Process-Related Variables and Physicochemical Properties on the Growth Kinetics, *Powder Technology*, 2003, vol. 130, no. 1-3, pp. 18-34. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00221-8

11. Zhang R., Hoffmann T., Tsotsas E. Novel Technique for Coating of Fine Particles Using Fluidized Bed and Aerosol Atomizer, *Processes*, 2020, vol. 8, no. 12, art. 1525. doi: 10.3390/pr8121525

12. Kartushinsky A.I., Rudi Yu.A., Tisler S.V., Khusainov M.T., Shcheglov I.N. [Network turbulence in a two-phase flow: influence of the parameters of the carrier medium and particles], *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Thermophysics], 2009, vol. 47, no. 2, pp. 292-298. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Seyedin S.H., Ardjmand M., Safekordil A.A., Raygan S. Experimental Investigation and CFD Simulation of Top Spray Fluidized Bed Coating System, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2017, vol. 61, no. 2, pp. 117-127.

14. Mitrofanov A.V., Ogurtsov A.V., Magnitsky V.A., Mizonov V.E., Tannous K. Mitrofanov, A.V. [Mathematical model of fluidization of a binary mixture of particles], *Vestnik IGEU* [Bulletin of IGEU], 2012, no. 1, pp. 45-47. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Ferziger J., Kaper G. *Matematicheskaya teoriya protsessov perenosa v gazakh* [Mathematical theory of transport processes in gases], Moscow: Mir, 1976, 554 p. (In Russ.)

Simulation der Anwendungsmodi der Polymerschutzverbindung auf Schleifmittel in einem Fluidbett für das Unterwasser-Wasserstrahlschneiden

Zusammenfassung: Dieser Artikel präsentiert die Ergebnisse der Modellierung des Einflusses der physikalischen Eigenschaften von Abrasivpartikeln auf die Luftströmungsgeschwindigkeit, um deren Fluidisierung für die Anwendung des Polymerverbundschutzes beim Unterwasser-Wasserstrahlschneiden zu gewährleisten. Weiterhin sind die Ergebnisse der mathematischen Modellierung des Beschleunigungsprozesses der Abrasivpartikel in einem Wirbelschichtbett auf Basis der Lösung der ermittelten Bewegungsgleichungen vorgestellt. Abschließend erfolgt die Analyse mathematischer Modellierungsmethoden zur Beschreibung des Fluidisierungsprozesses von Schüttgütern.

Modelisation des régimes d'application d'un compound-protecteur polymérique sur l'abrasif dans une couche bouillante pour la coupe hydroabrasive sous-marine

Résumé: Sont présentés les résultats dela modélisation de l'influence des propriétés physiques des particules abrasives sur la vitesse du flux d'air assurant leur fluidisation pour l'application d'un protecteur polymère en couche sous-marine par découpe hydroabrasive, ainsi que les résultats de la modélisation mathématique du processus d'accélération des particules abrasives dans la couche fluidisée basés sur la résolution des équations de mouvement obtenues. Est effectuée une analyse des méthodes de la modélisation mathématique applicables à la description du processus de la fluidisation des matières granulaires.

Авторы: ***Барсуков Геннадий Валерьевич*** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы»; ***Фроленков Константин Юрьевич*** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы»; ***Фетисов Александр Сергеевич*** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы»; ***Власов Виктор Викторович*** – кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы»; ***Петрухин Антон Владимирович*** – стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы», ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», Орел, Российская Федерация.