

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9

doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-4-13

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ АБРАЗИВА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДВОДНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ

Геннадий Валерьевич Барсуков^{1✉}, Ольга Геннадьевна Кожус², Егор Александрович Прасолов³, Елизавета Павловна Крыгина⁴, Даниил Петрович Сафронов⁵

^{1,2,3,4,5} Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия

¹ awj@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0436-4429>

² okozhus@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5942-652X>

³ prasolovegor@mail.ru

⁴ kirina090464@mail.ru

⁵ mechatronics_robotics@oreluniver.ru

Аннотация

В статье представлены результаты исследования особенностей движения частиц абразива в псевдооживленном слое при формировании полимерного покрытия в инкапсуляторе для обеспечения устойчивости подводной гидроабразивной резки. Предлагается снизить износ сопла и компонентов трубопроводных систем оборудования для подводной гидроабразивной резки путем покрытия абразива полимерным компаунд-протектором. В связи с этим, настоящая статья посвящена разработке методов, направленных на уменьшение склеивания частиц абразива при нанесении полимерного покрытия. Цель достигается путем формирования оптимальных условий для движения абразива

внутри камеры нанесения покрытия, функционирующей по принципу псевдооживленного слоя. В первой части статьи исследуется потенциальная возможность формирования жидких мостиков между частицами абразива при наличии жидкого полимерного раствора. Во второй части статьи определяются условия для эффективного размещения абразива в воздушном потоке камеры псевдооживления, что минимизирует вероятность их столкновений.

Ключевые слова: резание, трубка, сопло, струя, износ, поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания проект № 1024112000014-2-1.2.1;2.3.1 (FSGN-2025-0001).

Ссылка для цитирования:

Барсуков Г.В. Исследование особенностей движения частиц абразива при формировании полимерного покрытия для обеспечения устойчивости подводной гидроабразивной резки / Г.В. Барсуков, О.Г. Кожус, Е.А. Прасолов, Е.П. Крыгина, Д.П. Сафронов // Транспортное машиностроение. – 2026. – № 8. – С. 4-13. doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-4-13.

Original article

Open Access Article

STUDY OF FLOW FEATURES OF ABRASIVE PARTICLES DURING POLYMER COATING FORMATION TO ENSURE THE STABILITY OF UNDERWATER HYDROABRASIVE CUTTING

Abstract

The paper presents the results of a study of flow features of abrasive particles in a fluidized bed during the formation of a polymer coating in the encapsulator to ensure the stability of underwater hydroabrasive cutting. It is proposed to reduce the wear of the nozzle and components of pipeline systems of the equipment for underwater hydroabrasive cutting by coating the abrasive with a polymer compound protector. In this regard, this paper is devoted to the development of methods aimed at reducing the bonding of abrasive particles while applying polymer coating. The aim is achieved by creating optimal condi-

tions for the abrasive flow inside the coating chamber, which operates on the principle of a fluidized bed. The first part of the paper explores the potential for forming liquid bridges between abrasive particles in the presence of liquid polymer solution. The second part of the paper defines the conditions for effective placement of the abrasive in the air flow of the fluidization chamber, which minimizes the likelihood of their collisions.

Keywords: cutting, tube, nozzle, jet, wear, surfactants.

Funding: the study is funded by the project № 1024112000014-2-1.2.1;2.3.1 (FSGN-2025-0001).

Reference for citing:

Barsukov GV, Kozhus OG, Prasolov EA, Krygina EP, Safronov DP. Study of flow features of abrasive particles during polymer coating formation to ensure the stability of underwater hydroabrasive cutting. *Transport Engineering*. 2026;8:4-13. doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-4-13.

Введение

Новые нетрадиционные методы обработки материалов в настоящее время широко используются для решения различных задач в производстве, например, связанных с проблемами обработки новых материалов из-за уникальности их свойств и сложности технологического процесса при применении традиционных технологий обработки.

Среди различных передовых методов механической обработки, гидроабразивная резка (ГАР) вызывает значительный интерес у специалистов в области науки и производственных технологий, что объясняется уникальными преимуществами над традиционными методами обработки: отсутствием термического влияния в сочетании с минимальным механическим воздействием на материал, возможностью обработки сложных геометрических форм, отсутствием выделения вредных газов [1, 2].

В начале 2000-х годов технология ГАР нашла свое применение в подводных работах [3, 4]. Исследование, проведенное Б. Кивисто, представляет обзор потенциальных сфер использования ГАР для выполнения работ под водой по добыче полезных иско-

паемых [5], спасательных работ, разработки инфраструктуры, разведке и разработке нефтяных месторождений, а также очистки окружающей среды.

Такой интерес связан с тем, что работа под водой представляет собой одну из наиболее трудных задач при резке различных материалов. Давление воды, значительное сопротивление жидкости (в отличие от воздуха), высокая тепло- и электропроводимость воды, а также ограниченная видимость создают серьезные препятствия для использования традиционных методов резки.

Для подводной резки применяют два способа формирования гидроабразивной струи: прокачка абразивной суспензии через сопло и непосредственное смешивание жидкости с абразивом в сопле [6]. Подготовленная абразивная суспензия хранится в специальных емкостях и требует поддержания ее работоспособности, чтобы избежать оседания абразива в трубопроводной системе. Помимо прочего, прокачка абразивной суспензии под напором вызывает интенсивное эрозионное изнашивание элементов трубо-

проводов, включая клапаны и соединительные детали, применяемые в системе. Смешивание абразива с жидкостью в сопле имеет преимущество перед установкой, применяющей абразивную суспензию для подводной резки. Она более надежна, требует меньше технического обслуживания и может работать при внутреннем давлении истечения до 1000 МПа. Однако вода, попадающая в сопло, может затруднить или полностью нарушить работу системы подачи абразива. Попадание влаги в систему подачи абразива приводит к его увлажнению. Вследствие этого, абразивный материал приобретает комковатую, грязеподобную консистенцию.

Износ сопла при подводной гидроабразивной резке представляет значительную трудность для всех систем, формирующих гидроабразивную струю. Трудности возникают как с частой заменой сопла в сложных условиях эксплуатации, так и с тем, что увеличение диаметра выходного отверстия снижает рабочее давление, тем самым, ухудшая эффективность резки.

Чтобы преодолеть данную проблему, авторами данной работы предлагается инкапсулировать абразив в полимерное покрытие (полимерный компаунд-протектор (ПКП)) [7, 8]. Такой подход призван существенно уменьшить износ сопла и компонентов трубопроводных систем. Кроме того, он исключит нежелательное поглощение влаги абразивом при контакте с водой, что, в свою очередь, предотвратит засорение всей установки. В результате обеспечивается надежность и стабильность процесса подводной гидроабразивной резки.

Покрытие (инкапсуляция) абразива ПКП осуществляется в циркулирующей системе псевдооживленного слоя. Технология псевдооживленного слоя является распространенным методом, применяемым в процессах, используемых в химической, сельскохозяйственной, фармацевтической и пищевой промышленности для покрытия твердых частиц и придания им различных функций [9, 10].

Капиллярная адгезия частиц абразива

При наличии жидкого промежуточного слоя между абразивными частицами

Процесс нанесения ПКП на абразив в псевдооживленном слое состоит из трех основных этапов, включая псевдооживление твердых частиц, распыление раствора покрытия на слой псевдооживленных абразивных частиц и сушку покрытых частиц для испарения растворителя из раствора покрытия [11].

Качество покрытия абразива и эффективность процесса в значительной степени определяются характеристиками движения частиц с точки зрения времени пребывания и циркуляции [12, 13]. Когда влажные частицы сталкиваются друг с другом, между ними образуется влажный мостик. В зависимости от прочности жидкого мостика и кинетической энергии сталкивающихся частиц, эти мостики могут сохраняться после точки высыхания, где образуются сухие агломераты [14, 15].

Использование абразивного материала, агломераты которого образовались в ходе нанесения полимерного покрытия, вызовет засорение, как подающего трубопровода, так и сопла. Это, в свою очередь, приведет к полной остановке процесса подводной гидроабразивной резки. Отчистка системы подачи абразива сопряжена со значительными временными затратами, а сам процесс очистки является трудоемким и неприемлемым для подводных работ. В связи с этим, настоящая статья посвящена разработке методов, направленных на уменьшение склеивания частиц абразива при нанесении полимерного покрытия. Цель достигается путем формирования оптимальных условий для движения абразива внутри камеры нанесения покрытия, функционирующей по принципу псевдооживленного слоя. В первой части работы исследуется потенциальная возможность формирования жидких мостиков между частицами абразива при наличии жидкого полимерного раствора. Во второй части определяются условия для эффективного размещения абразива в воздушном потоке камеры псевдооживления, что минимизирует вероятность их столкновений.

наблюдается явление, известное как капиллярная адгезия [16]. Когда жидкое, еще не

застывшее полимерное покрытие, обладающее свойством смачивания, контактирует с основой абразива, межмолекулярное взаимодействие способствует формированию менисков. Жидкостные пленки, покрывающие поверхности двух частиц абразива, под воздействием поверхностных сил создают мениски, которые, стягивая друг друга, притягивают эти частицы. Схематическое изображение процесса, демонстрирующее, как формирование мениска на границе жидкой

пленки Δd между двумя абразивными частицами на расстоянии d приводит к их немедленному сближению, представлено на рис. 1б. Предшествующий момент этому состоянию, показанному на рис. 1а, соответствует фазе их столкновения. При этом одна из абразивных частиц или обе могут быть полностью или частично покрыты жидкой защитной полимерной пленкой до момента их контакта.

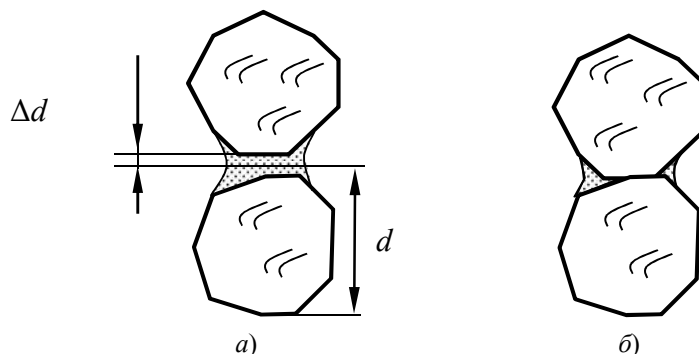


Рис. 1. Схема капиллярной адгезии между двумя частицами абразива
Fig. 1. Diagram of capillary adhesion between two abrasive particles

Согласно теореме Лапласа, в области под вогнутой поверхностью жидкости, образующей мениск, наблюдается пониженное давление по сравнению с атмосферным. Эта разница в давлении рассчитывается по формуле:

$$p_0 = \sigma_s \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где σ_s – поверхностное натяжение полимерного раствора; R_1 и R_2 – радиусы кривизны мениска.

Общая сила притяжения между частицами абразива представляет собой совокупность капиллярных сил, возникающих в зоне контакта. Эти силы обусловлены поверхностным натяжением и давлением. Если предположить полное смачивание, то сила, которую необходимо преодолеть для разделения частиц, состоит из двух компонентов: первый – это сила, связанная с отрицательным давлением в капилляре, а второй – это сила поверхностного натяжения, имеющая положительный знак. Данная сила выражается формулой:

$$F = \pi R_1 \sigma_s \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (2)$$

где R_1 – радиус пленки между абразивными частицами; R_2 – радиус мениска.

Исходя из этих рассуждений, если предположить, что первоначальная энергия движения сталкивающихся абразивных частиц полностью преобразуется в потенциальную энергию упругого сжатия W_n , и, впоследствии, эта энергия расходуется на преодоление образовавшегося межчастичного сцепления за счет капиллярных сил, то можно заключить следующее. При высоких скоростях столкновения абразивные частицы способны отделиться друг от друга. Это происходит, когда они движутся параллельно основному потоку воздуха. Однако, если абразивные частицы сталкиваются с небольшими относительными скоростями, что типично для поперечных колебаний около стенок камеры с псевдоожиженным слоем, то полученной потенциальной энергии их сжатия не хватит для преодоления сил капиллярного притяжения.

Энергия слипания абразивных частиц, возникающая при столкновении абразивных частиц в псевдоожиженном состоянии, может варьироваться в зависимости от места их соударения в камере установки относи-

тельно точки впрыска жидкого полимера и зоны нахождения в слое.

Сделаем следующие допущения.

1. Чтобы полимерное покрытие на абразиве равномерно распределилось по защищаемой частице, абразивным частицам необходимо часто взаимодействовать с жидкими частицами. Исходя из этого, допустимо, что средняя дистанция (свободный пробег) жидких частиц значительно короче, чем у абразивных.

2. Масса жидких частиц полимера предполагается намного меньшей, чем масса абразивных. Поэтому облако, формируемое

распыленной жидкой средой защитного материала, рассматривается как сплошное, с переменной плотностью.

В таких условиях, за время нахождения абразивной частицы в жидкой среде, толщина покрытия будет меньше там, где плотность этой среды ниже. Таким образом, неравномерность в формировании толщины покрытия не должна выходить за границы допустимых отклонений, определяемых условиями его целостности при гидроабразивном резании и его сохранности при прохождении частиц через зону смешивания с жидкостью в сопле.

Анализ движения частиц абразива в камере псевдооживления

Исходя из представленных выше допущений, справедливо заключить, что в области, где осуществляется нанесение защитного полимерного покрытия, весь абразивный материал оказывается закрытый жидкой, еще не затвердевшей, субстанцией. Одной из ключевых характеристик, определяющих эффективность условий процесса нанесения покрытия, считается минимизация вероятности контакта между частицами абразива. Эта вероятность выражается либо их частотой, либо обратной ей величиной - средним интервалом времени между соседними столкновениями. Ранее исследователями было выведено уравнение, описывающее частоту таких соударений.

Представленные выше допущения дают основание для утверждения о том, что в зоне нанесения покрытия все частицы абразива можно считать покрытыми жидким, не успевшим затвердеть, защитным слоем. Одним из критериев удовлетворительных условий нанесения считается минимальность вероятности столкновения абразивных частиц, характеризуемая их частотой или обратной ей величиной - средним временем

между двумя последовательными столкновениями.

Для частоты столкновений абразивных частиц запишем следующее выражение:

$$\nu = \pi d^2 v_{KB} n = \sigma v_{KB} n, \quad (3)$$

где d - средний диаметр абразивных частиц; v_{KB} - среднеквадратичная относительная скорость сталкивающихся частиц; n - число абразивных частиц в единице объема.

Анализ зависимости (3) показывает прямую связь указанной частоты от увеличения эффективного поперечного сечения абразивных частиц. Это означает, что с ростом размеров частиц, а также с увеличением их относительной скорости (обусловленной более быстрым преодолением среднего расстояния между частицами), наблюдается повышение частоты столкновений.

Аналогично, увеличение концентрации частиц в единице объема также приводит к росту данной частоты. Относительную скорость сталкивающихся частиц определим по уравнению, полученному в работе [17]:

$$\frac{\langle v_x^* \rangle}{U_\infty} = \left\langle \frac{\sqrt{v_x^{*2}}}{U_\infty} \right\rangle = 0,050, \quad \frac{\langle v_y^* \rangle}{U_\infty} = \left\langle \frac{\sqrt{v_y^{*2}}}{U_\infty} \right\rangle = 0,025, \quad \frac{\langle v_z^* \rangle}{U_\infty} = \left\langle \frac{\sqrt{v_z^{*2}}}{U_\infty} \right\rangle = 0,035, \quad (4)$$

где v_x^* , v_y^* , v_z^* - проекции вектора скорости единичной абразивной частицы вдоль потока и параллельно стенке камеры - ось OX , направленные поперек воздушного потока и перпендикулярно стенке - ось OY , и перпендикулярного потока и параллельного стенке

камеры - OZ [17]; U_∞ - максимальная скорость воздушного потока вдали от стенки камеры - рабочая скорость псевдооживления.

Наибольшие пульсации скорости частиц возникают вблизи стенки камеры псев-

доожигения. Так же наибольшим является

$$\frac{3kT^*}{m} = \frac{1}{n} \sum_i \int \frac{1}{2} (\vec{c}_i)^2 f(\vec{r}, \vec{c}, t) d^3 \vec{c}_i = \overline{v_x^{*2}} + \overline{v_y^{*2}} + \overline{v_z^{*2}} = (\overline{v})^2. \quad (5)$$

где $\overline{v}$ – средне квадратичная скорость пульсаций частиц абразива; k – постоянная Больцмана; m – масса частицы абразива; T^* –

$$\frac{3k\langle T^* \rangle}{mU^2} = 0,002500 + 0,000625 + 0,001225 \approx 0,4 \cdot 10^{-2}, \quad (6)$$

где U – скорость невозмущенного потока. В качестве величины относительной скорости принимается величина $v_{KB} = (\overline{v})$.

Необходимо отметить, что с удалением от граничной поверхности скорость пульсаций падает. Процесс формирования псевдоожигенного слоя будем считать завершившимся. Число n частиц в единице объема зависит от расстояния до стенки камеры псевдоожигения и определяются следующим образом. Давление воздуха на входе p_0 и на выходе p_1 , а значит и их разность $\Delta p = p_0 - p_1$ и скорость $U(y) = U(R - r)$ постоянные по толщине слоя при каждом значении $y = R - r$ – расстояния от стенки камеры. Вблизи стенок дуги зарождаются вихри с минимальным энергетическим запасом (рис. 2).

Однако они оказываются в зоне сильных градиентов скорости сдвигового течения, что позволяет им активно поглощать энергию из основного потока. Как показано на рис. 2, в центральной части потока (ядре) профиль скоростей приближается к линейному, тогда как в прилегающей к стенке области он искажен. Чтобы упростить последующие рассуждения, будем считать профиль скорости в каждой из зон линейным, с величиной скорости, равной средней скорости в рассматриваемой зоне. В пристеночном слое, имеющем толщину равную δ , движение воздуха можно рассматривать как чисто сдвиговое. Тогда средняя по его сечению скорость будет составлять $U = U_1 = (1/2)U_2$, где U_2 – скорость в упрощенном ядре потока.

Считается, что высота H_{cl} псевдоожигенного слоя в обоих слоях одна и та же, с течением времени не меняется, абразивные частицы не покидают псевдоожигенный

выражение распределения Максвелла:

аналог температуры дискретной среды, вычисляемый через среднюю кинетическую энергию частиц.

женный слой. В отсутствии абразивных частиц сила, созданная градиентом давления, «проталкивающая» газ в равномерном потоке уравнивается силами трения его о боковые стенки. При наличии абразива к силам трения о стенки добавляются еще и силы трения потока о взвешенные в нем частицы абразива. Их распределение в каждой из частей общего потока считаем равномерным и упрощает рассуждения. С учетом сказанного, как это делается в механике жидкостей при расчете стационарных течений в трубах [18], для каждого из описанных потоков составляется уравнение равновесия сил, приложенных в каждый момент времени к его части в границах псевдоожигенного слоя. С учетом сделанных допущений о параллельности течения боковым границам и перпендикулярности верхней и нижней границ псевдоожигенного слоя, в общем виде это уравнение имеет следующий вид.

$$\sum_{m=1}^M \tau_m S_m + \sum_{i=1}^I f_i = S \Delta p. \quad (7)$$

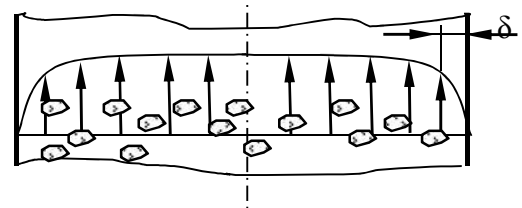


Рис. 2. Схема турбулентного потока в камере псевдоожигения по схеме Прандтля
Fig. 2. Diagram of the turbulent flow in the fluidization chamber according to Prandtl scheme

В этом выражении первая сумма слева – это сумма всех касательных сил с напряжениями τ_m на M боковых поверхностях с площадями S_m выделенной области слоя; вторая сумма – сумма всех сил f_i сопротивления I частиц абразива псевдоожигенного слоя, находящихся во взвешенном состоя-

нии в выделенной его части; S – площадь равных торцевых поверхностей слоя. В рассматриваемой ситуации $M=2$ – для пристенного слоя, и $M=1$ – для ядра потока. Общие числа $I=I_1$ и $I=I_2$, а также приходящиеся на единицу объема числа частиц $n=n_1$ и $n=n_2$ надо определить. Для пристенного слоя считается, что его толщина δ много меньше радиуса R его внешней боковой поверхности. Так что площади S_1 и S_2 можно считать примерно равными: $S_1=S_2=2\pi R H_{cl}$. Эта же площадь является внешней для ядра потока.

Пристенное течение является сдвиговым. С учетом того, что для него $S_1=S_2$, можно утверждать, что $\tau_2=-\tau_1=\mu(du/dy)\approx\mu(U_2/\delta)$, где μ – динамическая вязкость воздуха, и $\sum_{m=1}^M \tau_m S_m = 0$. Для ядра потока касательные напряжения действуют только на поверхности $S_2=2\pi R H_{cl}$. Их величина $\tau_2\approx\mu(U_2/\delta)$.

Поэтому сумма касательных напряжений, препятствующих потоку со стороны его внешних границ, определяется равенством

$$\sum_{m=1}^M \tau_m S_m = \tau_2 S_2 = (\mu(U_2/\delta))(2\pi R H_{cl}).$$

При определении сил f_i предполагается, что, во-первых, их взаимодействия с воздухом не влияют друг на друга, поэтому их суммарное воздействие на поток воздуха аддитивно, во-вторых, подчиняется закону Стокса (то есть $f_i=\alpha v$ – пропорционально скорости v набегающего на них потока). При определении коэффициента α считается, что каждая абразивная частица имеет сферическую форму. Поэтому $f_i=6\pi r_a \mu(U_2/2)=f_2=const$. Несмотря на неравенство $U_1 < U_2$ считается, что частица движется на встречу потоку со скоростью $f_i=6\pi r_a \mu(U_2/2)=f_1=const$. В результате суммарная сила сопротивления воздушному потоку от частиц абразива в пристенном слое определяется равенством:

$$\sum_{i=1}^I f_i = I_1 f_1 = (2\pi R H_{cl} \delta) n_1 (6\pi r_a \mu(U_2/2)) = (6\pi^2 R H_{cl} r_a \delta \mu U_2) n_1. \quad (8)$$

Для ядра потока аналогичная величина примет значение:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I f_i &= I_1 f_1 = \left(\pi (R-\delta)^2 H_{cl} \right) n_2 (6\pi r_a \mu(U_2)) = \\ &= (6\pi^2 (R-\delta)^2 H_{cl} r_a \mu U_2) n_2 \approx (6\pi^2 R^2 h r_a \mu U_2) n_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Величина S в первом случае $S=2\pi R \delta$, во втором случае $S=\pi(R-\delta)^2 \approx \pi R^2$.

С учетом сказанного, уравнение баланса сил (7) для пристенного слоя приобретает следующий вид:

$$0 + (6\pi^2 R h r_a \delta \mu U_2) n_1 = (2\pi R \delta)(\Delta p). \quad (10)$$

Для ядра потока аналогичное равенство имеет вид:

$$(\mu(U_2/\delta))(2\pi R h) + (6\pi^2 R^2 h r_a \mu U_2) n_2 = (\pi R^2)(\Delta p). \quad (11)$$

Из этих равенств вытекают формулы для оценки среднего числа частиц в еди-

нице объема пристенного слоя потока и его ядра:

$$n_1 = \frac{(\Delta p)/H_{cl}}{3\pi r_a \mu U_2}, \quad (12)$$

$$n_2 = \frac{\Delta p - 2\mu(U_2/\delta)(H_{cl}/R)}{6\pi H_{cl} r_a \mu U_2} = \frac{(\Delta p)/H_{cl}}{6\pi H_{cl} r_a \mu U_2} - \frac{1}{3\pi r_a \delta R}. \quad (13)$$

При отсутствии сопротивления со стороны абразивных частиц получается известное из гидродинамики равенство:

$$\frac{2\mu(U_2/\delta)}{R} = \frac{(\Delta p)}{H_{cl}} = 2\frac{\tau}{R}. \quad (14)$$

$$n_1 = \frac{(\Delta p)/h}{3\pi r_a \mu U_2} > n_2 = \frac{\Delta p - 2\mu(U_2/\delta)(h/R)}{6\pi h r_a \mu U_2} = \frac{(\Delta p)/h}{6\pi h r_a \mu U_2} - \frac{1}{3\pi r_a \delta R}. \quad (15)$$

Это неравенство свидетельствует о том, что в пристенном слое вероятность парных столкновений и их частота намного выше, чем в ядре потока. Об этом же свидетельствует и то, что в пристенной

Это подтверждает справедливость преобразований. Сравнивая (12) и (13), можно убедиться в том, число приходящихся на единицу объема приповерхностного слоя частиц больше аналогичного числа в его ядре:

области камеры псевдооживления пульсации скорости частиц, а значит и их относительная скорость значительно выше, чем в ядре.

Заключение

Для исключения слипания абразивных частиц предлагается:

1. Исключить из конструкции установки для инкапсуляции абразивных частиц подачу жидкого полимера через боковые стенки камеры с псевдооживленным слоем. Необходимо использовать такую подачу распыленного полимера, при котором его основная распыленная масса окажется в ядре псевдооживленного слоя, где абразивные частицы находятся во взвешенном состоянии, вероятность и частота их столкновения малы, времени между столкновениями достаточно для затвердевания покрытия.

2. Стенки камеры псевдооживления необходимо сделать проницаемыми для дополнительного воздушного потока, который увеличит среднюю скорость воздуха в пристенной зоне, способствуя возникновению взвеси и препятствуя оседанию части абразивных частиц, покрытых жидкой пленкой. Кроме того, это исключит гидродинамическое прилипание потока воздуха к боковым стенкам и уменьшит турбулентные колебания скорости, а значит и вероятность столкновения абразивных частиц, а также будет способствовать быстрому высыханию защитного покрытия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Llanto J., Tolouei-Rad M., Vafadar A., Aamir M. Recent Progress Trend on Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Materials: A Review. *Applied Sciences*. 2021. 11. 3344. 10.3390/app11083344.
2. Kartal F., Kaptan A. Comprehensive and essential review of advanced researches abrasive waterjet machining. *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 2025. 9. 50-69. 10.35860/iarej.1582470.
3. Kivisto B. Waterjet Technology and Applications—Deepwater Subsea // *Proceedings of the International Conference and Exhibition on Oil Spill India*. 2011. URL: <https://chukarwaterjet.com/wp-content/uploads/2018/07/Whit>.
4. Technical countermeasures research on deep sea shipwreck water cutting engineering / S. Xue [et al] // 2019 WJTA Conference and Expo November 11-13, 2019. URL: <https://www.wjta.org/images/wjta/Proceedings/Papers/2019/C3.pdf>.
5. Borkowski, P., Borkowski, J. (2011). Basis of High pressure Water Jet Implementation for Polymetallic Concretions Output from the Ocean's Bottom. *Rocznik Ochrony Srodowiska Selected full texts*, 13, ppg. 65-82.
6. Mugla D.R., Galinovskiy A.L., Kobernik N.V. Selection of Rational Technological Modes and Parameters of Underwater Waterjet Cutting. In: Radionov, A., Kravchenko, O., Guzeev, V., Rozhdestvenskiy, Y. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_29
7. Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю. Особенности нанесения полимера на поверхность абразивного зерна для повышения эффективности гидроабразивного резания // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2021. № 2(346). С. 86-

92. DOI 10.33979/2073-7408-2021-346-2-86-92. – EDN DUQUNZ.
8. Барсуков Г.В., Шоркин В.С., Кожус О.Г., Журавлева Т.А. Расчет контакта композитного абразива со стенками сопла, обеспечивающий снижение износа фокусирующей трубки гидроабразивной установки // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2020. № 2(340). С. 62-67. DOI 10.33979/2073-7408-2020-340-2-62-67. EDN DZANWC.
9. Krupa A., Jachowicz R., Kurek M., Figiel W., Kwiecień M. Preparation of solid self-emulsifying drug delivery systems using magnesium aluminometasilicates and fluid-bed coating process. *Powder Technology*. 266, pp. 329-339. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.043>
10. Karlsson S., Rasmuson A., Niklasson Björn, I., Schantz S. Characterization and mathematical modelling of single fluidised particle coating. *Powder Technology*. 207(1-3), pp. 245-256. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.11.006>
11. Werner S.R.L., Jones J.R., Paterson, A.H J. Air suspension particle coating in the food industry: Part I- State of the art. *Powder Technology*. 171(1), pp. 25-33. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.014>
12. Depypere F., Pieters J.G., Dewettinck K. CFD analysis of air distribution in fluidised bed equipment. *Powder Technology*. 145(3), pp. 176-189. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.06.005>
13. Vanderroost M., Ronsse F., Dewettinck K., Pieters J.G. Modelling overall particle motion in fluidized

- beds for top-spray coating processes. *Particuology Journal*. 11(5), pp. 490-505. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.07.012>
14. Smith P.G., Nienow, A.W. Particle growth mechanisms in fluidized bed granulation. I. The effects of process variables. *Chemical Engineering Science*. 38(8), pp. 1223-1231. 1983. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(83\)80042-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(83)80042-6)
15. Saleh K., Cherif R., Hemati M. An experimental study of fluidized bed coating: Influence of operating conditions on growth rate and mechanism. *Advanced Powder Technology*. 10(3), pp. 255-277. 1999. <https://doi.org/10.1163/156855299x00334>
16. Матюхин С.И. Краевой угол смачивания, как критерий адгезионных свойств поверхности и энергетического состояния молекул на границе раздела двух фаз // С. И. Матюхин, К. Ю. Фроленков // *Труды Международного научного симпозиума «Гидродинамическая теория смазки – 120 лет»*. М.: Машиностроение-1, Орел: ОрелГТУ, 2006. Т. 2. С. 102-109.
17. Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю. Исследование условий залипания агломератов абразивных частиц на стенках камеры установки псевдооживления при формировании соединения абразив-полимер // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал*. 2022. № 3 (353). С. 22-28. DOI 10.12731/2070-7992-2022-3-22-28. EDN HAQYLN.
18. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Дрофа, 1970. 840 с.

REFERENCES

1. Llanto J, Tolouei-Rad M, Vafadar A, Aamir M. Recent Progress Trend on Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Materials: Review. *Applied Sciences*. 2021;11:3344.
2. Kartal F, Kaptan A. Comprehensive and essential review of advanced researches abrasive waterjet machining. *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 2025;9:50-69.
3. Kivisto B. Waterjet Technology and Applications–Deepwater Subsea. *Proceedings of the International Conference and Exhibition on Oil Spill India [Internet]*. 2011. Available from: <https://chukarwaterjet.com/wp-content/uploads/2018/07/Whit>.
4. Xue S. Technical countermeasures research on deep sea shipwreck water cutting engineering[Internet]. WJTA Conference and Expo, November 11-13, 2019. Available from: <https://www.wjta.org/images/wjta/Proceedings/Papers/2019/C3.pdf>.
5. Borkowski P, Borkowski, J. Basis of High pressure Water Jet Implementation for Polymetallic Con cretions Output from the Ocean's Bottom. *Rocznik Ochrony Srodowiska Selected full texts*. 2011;13:65-82.
6. Mugla DR, Galinovskiy AL, Kobernik NV. Selection of Rational Technological Modes and Param-

- eters of Underwater Waterjet Cutting. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*, 2018: Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer: Cham; 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_29
7. Kozhus OG, Barsukov GV, Shorkin VS, Frolenkova LYu. Features of polymer deposition on the surface of abrasive grain to increase the efficiency of hydroabrasive cutting. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2021;2(346):86-92. DOI 10.33979/2073-7408-2021-346-2-86-92.
8. Barsukov GV, Shorkin VS, Kozhus OG, Zhuravleva TA. Calculation of the contact of a composite abrasive with the nozzle walls, which reduces wear on the focusing tube of a hydroabrasive installation. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2020;2(340):62-67. DOI 10.33979/2073-7408-2020-340-2-62-67.
9. Krupa A, Jachowicz R, Kurek M, Figiel W, Kwiecień M. Preparation of solid self-emulsifying drug delivery systems using magnesium aluminometasilicates and fluid-bed coating process. *Powder Technology [Internet]*. 2014;266:329-339. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.043>

10. Karlsson S, Rasmuson A, Niklasson BI, Schantz S. Characterization and mathematical modelling of single fluidised particle coating. Powder Technology [Internet]. 2011;207(1-3):245-256. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.11.006>
11. Werner SRL, Jones JR, Paterson, AHJ. Air suspension particle coating in the food industry: Part I- State of the art. Powder Technology [Internet]. 2007;171(1):25-33. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.014>
12. Depypere F, Pieters JG, Dewettinck K. CFD analysis of air distribution in fluidised bed equipment. Powder Technology [Internet]. 2004;145(3):176-189. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.06.005>
13. Vanderroost M, Ronsse F, Dewettinck K, Pieters JG. Modelling overall particle motion in fluidized beds for top-spray coating processes. Particulate Journal [Internet]. 2013;11(5):490-505. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.07.012>
14. Smith PG, Nienow AW. Particle growth mechanisms in fluidized bed granulation. I. The effects of process variables. Chemical Engineering Science [Internet]. 1983;38(8):1223-1231. Available from: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(83\)80042-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(83)80042-6)
15. Saleh K, Cherif R, Hemati M. An experimental study of fluidized bed coating: Influence of operating conditions on growth rate and mechanism. Advanced Powder Technology [Internet]. 1999;10(3):255-277. Available from: <https://doi.org/10.1163/156855299x00334>
16. Matyukhin SI, Frolenkov KYu. The interfacial angle as a criterion of the adhesive properties of the surface and the energetic state of molecules at the interface of two phases. Proceedings of the International Scientific Symposium, 2006: Hydrodynamic Theory of Lubrication – 120 years. Moscow: Mashinostroenie-I; Orel: Orel State Technical University. 2006;2:102-109.
17. Kozhus OG, Barsukov GV, Shorkin VS, Frolenkova LYu. Study of the conditions of adhesion of abrasive particles agglomerates on the walls of the fluidization chamber during the formation of an abrasive polymer compound. Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology. 2022;3(353):22-28. DOI 10.12731/2070-7992-2022-3-22-28.
18. Loitsyansky LG. Mechanics of liquid and gas. Moscow: Drofa;1970.

Информация об авторах:

Барсуков Геннадий Валерьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии», тел. +79103066171.

Кожус Ольга Геннадьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-

исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы», тел. +79102668598.

Прасолов Егор Александрович – Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева.

Крыгина Елизавета Павловна – Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева.

Сафронов Даниил Петрович – Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева.

Barsukov Gennady Valerievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Advanced Manufacturing Technologies Research Laboratory; phone: +79103066171.

Kozhus Olga Gennadievna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the New Abrasive Materials Research Laboratory; phone: +79102668598.

Prasolov Egor Aleksandrovich – Orel State University named after I.S. Turgenev.

Krygina Elizaveta Pavlovna – Orel State University named after I.S. Turgenev.

Safronov Daniil Petrovich – Orel State University named after I.S. Turgenev.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 01.06.2026; одобрена после рецензирования 06.07.2026; принята к публикации 27.07.2026. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 01.06.2026; approved after review on 06.07.2026; accepted for publication on 27.07.2026. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.