



УДК 544.454.3

Оценка вероятности столкновения разноразмерных частиц порошков при формировании композиционных покрытий детонационным способом

С. Ю. Ганигин, М. С. Гречухина, А. С. Нечаев

Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Аннотация

Представлены результаты оценки вероятности столкновения разноразмерных частиц материалов при получении композиционных покрытий детонационным способом на кумулятивные облицовки перфорационных систем, используемых при вскрытии нефтяных и газовых пластов. Вследствие разных свойств исходных металлических порошков, используемых для получения композиционных покрытий, взаимодействие их частиц между собой в газотермическом потоке может привести к преждевременному протеканию химических реакций, что приведет к снижению эффективности получаемого покрытия. Предварительный расчет вероятности столкновения частиц металлических порошков позволяет обосновать применяемые технологические режимы нанесения покрытий.

Ключевые слова: детонационное напыление, поток частиц, вероятность столкновения, композиционные материалы, покрытие.

Получение: 24 июня 2023 г. / Исправление: 6 декабря 2023 г. /

Принятие: 13 декабря 2023 г. / Публикация онлайн: 26 декабря 2023 г.

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ Краткое сообщение

© Коллектив авторов, 2023

© СамГТУ, 2023 (составление, дизайн, макет)

 Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Ганигин С. Ю., Гречухина М. С., Нечаев А. С. Оценка вероятности столкновения разноразмерных частиц порошков при формировании композиционных покрытий детонационным способом // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2023. Т. 27, № 4. С. 753–764. EDN: ZOLSXS. DOI: [10.14498/vsgtu2039](https://doi.org/10.14498/vsgtu2039).

Сведения об авторах

Сергей Юрьевич Ганигин  <https://orcid.org/0000-0001-5778-6516>

доктор технических наук, доцент; декан; инженерно-технологический факультет;
e-mail: gannigin.s.yu@yandex.ru

Мария Сергеевна Гречухина  <https://orcid.org/0000-0001-7797-3802>

кандидат технических наук; старший научный сотрудник; лаб. цифровых двойников материалов и технологических процессов их обработки; e-mail: mariya_grechukhina@mail.ru

Александр Сергеевич Нечаев  <https://orcid.org/0000-0002-0939-8292>

кандидат технических наук; доцент; каф. радиотехнических устройств;
e-mail: nechaev-as@mail.ru

1. Введение. Для повышения глубины пробития нефтяных и газовых пластов перспективно использовать кумулятивные облицовки в многослойном исполнении с покрытием из высокоплотных композиционных материалов [1–3], в том числе реакционных [4]. Для получения таких покрытий оптимизируют комплекс факторов, определяющих поведение частиц различного размера напыляемой смеси металлических порошков с момента появления их в стволе детонационной пушки и до слияния их в материале покрытия [5–8].

Принципиальная схема детонационной установки и процесс движения частиц порошка в ней показан на рис. 1. Разноразмерные частицы после вылета из дозатора подачи порошка попадают в ствол детонационной установки, проходя путь, равный длине ствола пушки, а также расстояние от среза ствола до облицовки [9]. Максимальные значения производительности и коэффициента использования порошка наблюдаются при минимальной дистанции напыления в 60 мм [10], но качество покрытий при этом снижается.

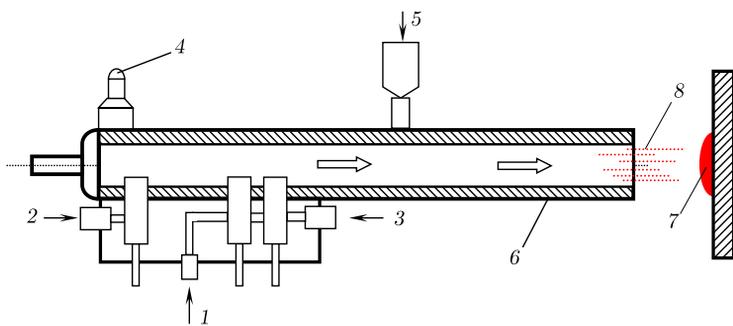


Рис. 1. Принципиальная схема детонационной установки: 1 — горючее; 2 — инертный газ; 3 — кислород; 4 — свеча зажигания; 5 — дозатор подачи порошка; 6 — ствол детонационной пушки; 7 — кумулятивная облицовка, 8 — поток частиц

[Figure 1. Schematic diagram of the detonation unit: 1 — fuel; 2 — inert gas; 3 — oxygen; 4 — spark plug; 5 — powder supply dispenser; 6 — the barrel of the detonation cannon; 7 — cumulative cladding; 8 — particle flow]

В связи с этим, основываясь на ранее проведенных исследованиях [3], дистанцию напыления для реакционных порошков принимаем равной 150 мм.

Одними из основных требований являются отсутствие реакции между компонентами порошковой смеси, находящейся в стволе детонационной установки в момент нанесения покрытия [11], и исключение возможности столкновения их частиц друг с другом на участке от среза ствола до поверхности кумулятивной облицовки.

2. Оценка вероятности столкновения частиц порошков при детонационном напылении. Вероятность, с которой частицы могут сталкиваться в процессе нанесения покрытия детонационным методом, зависит от ряда факторов: количества частиц в навеске, их массы и дисперсности, расстояния между навесками в канале ствола, динамики движения частиц, которая определяется скоростью и траекторией полета и т.д. Без принятия ряда допущений задача оценки вероятности столкновения частиц становится весьма трудной, а зачастую — нерешаемой из-за отсутствия необходимых начальных данных. В связи с этим были введены некоторые условия, позволяющие упростить постановку задачи, что не окажет значительного влияния на

получение функциональной зависимости вероятности столкновения частиц, отражающей физические принципы протекающего процесса [12]:

- 1) будем считать, что поток частиц имеет линейную траекторию движения, а циркуляционные потоки возникают лишь в процессе отражения детонационного потока от подложки, что уже не сказывается на формировании покрытия;
- 2) распределение частиц в процессе их движения носит равномерный характер в рассматриваемом объеме, а вероятности нахождения частиц веществ в рассматриваемом рабочем пространстве не зависят друг от друга;
- 3) поскольку, проходя через порошковые сита при производстве, частицы приобретают многогранную полиэдрическую форму [13], для получения численных значений искомых показателей примем, что частицы имеют сферическую форму, и это позволяет считать линейные размеры частиц постоянными;
- 4) влияние внутренней поверхности ствола на движение и вероятность столкновения частиц в стволе будем считать незначительным, что обосновывается достаточно существенным значением отношения количества частиц, не соприкасающихся с внутренней стенкой ствола и соприкасающихся с ней при ламинарном движении потока;
- 5) столкновение частиц будем считать абсолютно неупругим ударом.

На рис. 2 схематично представлено распределение частиц по длине в канале ствола, где показано распределение малых и больших частиц с учетом указанных выше допущений. На данном рисунке окружность, выделенная пунктирной линией, отражает область около больших частиц, указывающую на то пространство, где нахождение малой частицы соответствует условию их столкновения.

Принимаем, что в определенный момент времени на одном участке поперечного среза ствола находится некоторое количество частиц N большого радиуса и частиц n малого радиуса. В этом случае выражение для оценки вероятности столкновения частиц $P(nN)$ может быть представлено в виде

$$P(nN) = \sum_{i=1}^{[x/\Delta]} \frac{N_i n_i (r_b + r_s)^2}{R^2}, \quad (1)$$

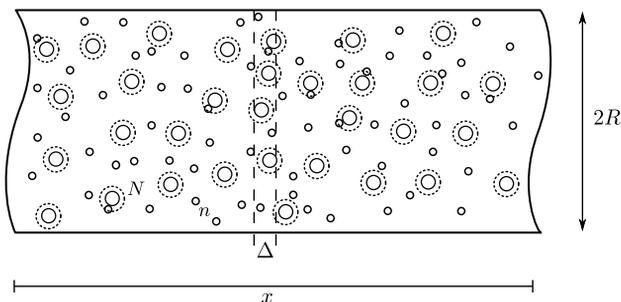


Рис. 2. Схема распределения разноразмерных частиц в стволе детонационной установки [Figure 2. The scheme of distribution of different-sized particles in the barrel of the detonation unit]

где N_i — количество частиц большого радиуса на i -том участке траектории длиной Δ ; n_i — количество частиц малого радиуса на i -том участке траектории длиной Δ ; R — внутренний радиус канала ствола; r_b и r_s — радиусы большой и малой частиц соответственно; $[x/\Delta]$ — целое количество малых дискретных длин Δ на всем расстоянии x .

Выражение (1) определяет вероятность того, что хотя бы одна частица малого размера столкнется с частицей большого размера в ракурсе поперечного среза ствола установки детонационного напыления. Для определения вероятности контакта частиц двух веществ во всей этой области удобнее рассмотреть вероятность контакта частиц в малом объеме [11], из которого путем сложения счетного их количества можно получить вероятность контакта частиц во всем исследуемом объеме. Исходя из этого, можно принять универсальную величину малого объема, получаемую из площади поперечного сечения ствола детонационной установки, длиной Δ .

Вероятность того, что хотя бы одна малая частица одного вещества войдет в область контакта хотя бы одной большой частицы другого вещества в определенном нами малом объеме, будет выражаться так:

$$P(n_{\Delta}N_{\Delta}) = \frac{2N_{\Delta}n_{\Delta}(r_b + r_s)^2}{3R^2},$$

где N_{Δ} и n_{Δ} — количество больших и малых частиц вещества в заданном малом объеме.

Для всей рассматриваемой области вероятность контакта $P_x(nN)$ больших и малых частиц при равномерном распределении частиц во всем времени протекания процесса будет определяться выражением

$$P_x(n_{\Delta}N_{\Delta}) = 1 - \left(1 - \frac{2N_{\Delta}n_{\Delta}(r_b + r_s)^2}{3R^2}\right)^{[x/\Delta]}. \quad (2)$$

При несоблюдении условия линейности траектории движения частиц или при непостоянстве скорости потока возникает ошибка при расчетах по предложенной модели (2). В этом случае для коррекции модели предлагается рассматривать малые объемы, считая скорость потока частиц в них постоянной и равной усредненному значению скоростей частиц на входе и на выходе этой зоны.

Зависимость (2) можно считать выражением, дающим оценку вероятности столкновения частиц порошков двух металлов в процессе детонационного напыления с учетом приведенных допущений. Из этого выражения также следует, что при больших величинах N_{Δ} и n_{Δ} вероятность контакта двух частиц будет велика, однако нужно понимать, что исходя из условия проведения численного эксперимента величины N_{Δ} и n_{Δ} будут ограничены размерами самих частиц и внутренним радиусом ствола.

3. Проверка соответствия зависимости для оценки вероятности столкновения частиц в процессе детонационного напыления экспериментальным данным. Для проверки работоспособности полученной зависимости были произведены математические расчеты. Для расчета были выбраны размеры больших и малых частиц двух металлических порошков с дисперсностью 6 и 3 мкм соответственно. Диаметр ствола детонационной

пушки принимается равным 5 мм. Расстояние от границы среза ствола до получаемой детали (кумулятивной облицовки) варьируется в зависимости от свойств исходных наносимых порошков.

Считаем, что частицы после вылета из ствола продолжают двигаться прямолинейно и конечная площадь нанесения композиционного покрытия соответствует диаметру ствола детонационной установки.

Для оценки данных процесса детонационного напыления будем использовать вероятность столкновения минимум двух частиц (одной большой и одной малой) при определенных условиях с помощью формулы (2).

2.1. Исследование вероятности столкновения частиц порошков с одинаковым количеством одного и второго компонентов. Проведем несколько расчетов, изменяя количество напыляемых частиц и дальность их полета, по формуле (2). В табл. 1 представлены данные расчета вероятности столкновения частиц по формуле (2). Здесь в строках приведена зависимость вероятности столкновения частиц от величины $[x/\Delta]$, которая напрямую зависит от расстояния между дулом ствола экспериментальной установки и подложки при постоянном значении количества частиц. В столбцах приведены значения вероятностей столкновения частиц при постоянном значении $[x/\Delta]$, но изменяющихся значениях $n = N$.

Таблица 1

Вероятностная оценка столкновения частиц, вычисленная по формуле (2)
 [Probabilistic estimate of particle collision calculated by formula (2)]

$x, \text{ mm}$	0.05	0.1	0.28	0.46	0.64
$[x/\Delta]$	3	5	15	25	35
$n = N$					
50	0.0019	0.0018	0.00036	0.00021	0.0001
100	0.0077	0.0043	0.0014	0.00086	0.0006
200	0.0311	0.0172	0.0057	0.0034	0.0024
300	0.0699	0.0388	0.0129	0.0078	0.0055
400	0.1244	0.0691	0.0230	0.0138	0.0098
500	0.1944	0.1080	0.0360	0.0216	0.0154
700	0.3810	0.2116	0.0705	0.0423	0.0302
900	0.6298	0.3499	0.1166	0.0699	0.0499
1200	1.1197	0.6220	0.2073	0.1244	0.0889
1350	1.4171	0.7873	0.2624	0.1574	0.1124

Из приведенных в табл. 1 расчетов видно, что при достижении определенной величины количества частиц вероятность их столкновения превышает единицу,¹ что является невозможным, поэтому необходимо модернизировать ранее полученную формулу (2).

В [14] описывается возможность использования показательного закона распределения при анализе физических закономерностей диффузии частиц в различных воздушных и гидродинамических потоках. Это распределение характеризуется интенсивностью столкновения частиц, которая является удобным параметром, используемым в математических моделях и расчетах. Исходя из этого примем закон распределения вероятности как изменение от числа

¹Данный результат расчета связан со слишком плотной упаковкой рассматриваемого количества частиц в малом объеме.

больших и малых частиц по показательному закону:

$$f(a) = \begin{cases} 0, & a < 0, \\ 1 - \exp(-\lambda a), & a \geq 0, \end{cases}$$

где λ — феноменологический параметр.

Под экспоненту вместо постоянной безразмерной величины λ поставим выражение, отражающее отношение объема присутствующих частиц к объему области движения частиц:

$$\lambda = [x/\Delta] \frac{2(r_b + r_s)^2}{3R^2}.$$

Тогда окончательно получим

$$f(N_\Delta n_\Delta) = 1 - \exp\left(-[x/\Delta] \frac{2(r_b + r_s)^2}{3R^2} N_\Delta n_\Delta\right). \quad (3)$$

В табл. 2 представлены данные расчета вероятности столкновения частиц по формуле (3).

Таблица 2

Вероятностная оценка столкновения частиц, вычисленная по формуле (3)

[Probabilistic estimate of particle collision calculated by formula (3)]

$x, \text{ mm}$	0.05	0.1	0.28	0.46	0.64
$[x/\Delta]$	3	5	15	25	35
$n = N$					
50	0.0019	0.0010	0.00035	0.00021	0.0001
100	0.0077	0.0043	0.0014	0.00086	0.0006
200	0.0306	0.0171	0.0057	0.0034	0.0024
300	0.0675	0.0381	0.0128	0.0077	0.0055
400	0.1169	0.0667	0.0227	0.0137	0.0098
500	0.1766	0.1023	0.0353	0.0213	0.0153
700	0.3168	0.1907	0.0680	0.0414	0.0297
900	0.4673	0.2952	0.1100	0.0675	0.0487
1200	0.6736	0.4631	0.1872	0.1169	0.0850
1350	0.7576	0.5449	0.2308	0.1456	0.1063

Из приведенных расчетных данных видно, что при малом количестве частиц значения вероятностных характеристик соотношений (2) и (3) практически совпадают, а при большом количестве частиц формула (3) дает лучшее соответствие физическому процессу.

В табл. 3 приведены расчеты по формуле (3) при больших значениях $[x/\Delta]$, которые отражают вероятностную оценку столкновения частиц при большем отдалении облицовки от выхода канала ствола.

Из результатов, приведенных в табл. 3, видно, что при условии равномерности распределения частиц по всему рабочему объему вероятность столкновения частиц уменьшается с ростом расстояния между облицовкой и дулом ствола. Полученные значения могут использоваться в качестве некоторой критериальной оценки при размещении облицовки в процессе отработки технологических режимов детонационного напыления.

Таблица 3

Вероятностная оценка столкновения частиц при больших значениях $[x/\Delta]$, вычисленная по формуле (3) [Probabilistic estimate of particle collisions at high values of $[x/\Delta]$ calculated by formula (3)]

x, m	0.1	0.12	0.14	0.16
$n = N$ $[x/\Delta]$	5560	6670	7780	8890
100	$3.887 \cdot 10^{-6}$	$3.239 \cdot 10^{-6}$	$2.777 \cdot 10^{-6}$	$2.43 \cdot 10^{-6}$
300	$3.499 \cdot 10^{-5}$	$2.915 \cdot 10^{-5}$	$2.499 \cdot 10^{-5}$	$2.187 \cdot 10^{-5}$
500	$9.719 \cdot 10^{-5}$	$8.099 \cdot 10^{-5}$	$6.942 \cdot 10^{-5}$	$6.074 \cdot 10^{-5}$
700	$19.049 \cdot 10^{-5}$	$15.874 \cdot 10^{-5}$	$13.607 \cdot 10^{-5}$	$11.906 \cdot 10^{-5}$
1200	$55.971 \cdot 10^{-5}$	$46.645 \cdot 10^{-5}$	$39.982 \cdot 10^{-5}$	$34.985 \cdot 10^{-5}$
1350	$70.833 \cdot 10^{-5}$	$59.031 \cdot 10^{-5}$	$50.6 \cdot 10^{-5}$	$44.276 \cdot 10^{-5}$

2.2. Исследование вероятности столкновения частиц металлических порошков с одинаковой массой насыпок. Найдем массу одной частицы каждого из напыляемых порошков. Для этого примем отношение плотностей одного металла ко второму равным 6 (соотношение плотностей, используемых для напыления металлических порошков).

Из условия постоянства линейных размеров частиц ранее были выбраны большие и малые частицы дисперсностью 6 и 3 мкм соответственно. Принимая во внимание тот факт, что частицы имеют сферическую форму с известным диаметром и известным отношением плотностей, можно достаточно просто определить количество больших и малых частиц в насыпках металла, имеющих равную массу. Авторами было определено количество частиц большого N и малого n размеров, имеющих одинаковую массу насыпок, значения которых приведены в первых столбцах табл. 4 и 5. По формуле (3) были рассчитаны вероятности столкновения частиц в канале ствола до их соударения с облицовкой в зависимости от числа частиц большого и малого размера (см. табл. 4).

Таблица 4

Вероятностная оценка столкновения частиц для одинаковых по массе насыпок при малых значениях $[x/\Delta]$, вычисленная по формуле (3) [Probabilistic estimate of particle collision for identical bulk masses at small values of $[x/\Delta]$ calculated by formula (3)]

x, mm	0.05	0.1	0.28	0.46	0.64
$N; n$ $[x/\Delta]$	3	5	15	25	35
$N = 12; n = 92$	0.00079	0.00047	0.00015	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$6.813 \cdot 10^{-5}$
$N = 20; n = 154$	0.0022	0.0013	0.00044	0.00026	0.00019
$N = 46; n = 370$	0.0121	0.0073	0.0024	0.00146	0.00104
$N = 65; n = 524$	0.0242	0.0146	0.0048	0.0029	0.0020
$N = 85; n = 679$	0.0407	0.0246	0.0082	0.0049	0.0035
$N = 104; n = 833$	0.0604	0.0367	0.0123	0.0074	0.0053
$N = 150; n = 1203$	0.1218	0.0749	0.0256	0.0154	0.0110
$N = 208; n = 1666$	0.2208	0.1390	0.04867	0.0294	0.0211
$N = 266; n = 2129$	0.3348	0.2170	0.0783	0.0477	0.0343
$N = 293; n = 2345$	0.3902	0.2568	0.0942	0.0576	0.0415

В табл. 5 приведены результаты расчета при больших значениях $[x/\Delta]$, полученные по формуле (3), что соответствует большему удалению облицовки от среза канала ствола, при равенстве масс насыпок.

Таблица 5

Вероятностная оценка столкновения частиц для одинаковых по массе насыпок при больших значениях $[x/\Delta]$, вычисленная по формуле (3) [Probabilistic estimate of particle collisions for identical bulk masses at high values of $[x/\Delta]$ calculated by formula (3)]

x, m	0.1	0.12	0.14	0.16
$[x/\Delta]$	5560	6670	7780	8890
$N; n$				
$N = 20; n = 154$	$1.197 \cdot 10^{-7}$	$9.979 \cdot 10^{-7}$	$8.553 \cdot 10^{-7}$	$7.484 \cdot 10^{-7}$
$N = 65; n = 524$	$1.324 \cdot 10^{-5}$	$1.103 \cdot 10^{-5}$	$9.459 \cdot 10^{-6}$	$8.276 \cdot 10^{-6}$
$N = 104; n = 833$	$3.368 \cdot 10^{-5}$	$2.806 \cdot 10^{-5}$	$2.405 \cdot 10^{-5}$	$2.105 \cdot 10^{-5}$
$N = 150; n = 1203$	$7.015 \cdot 10^{-5}$	$5.846 \cdot 10^{-5}$	$5.011 \cdot 10^{-5}$	$4.384 \cdot 10^{-5}$
$N = 266; n = 2129$	$22.015 \cdot 10^{-5}$	$18.346 \cdot 10^{-5}$	$15.726 \cdot 10^{-5}$	$13.760 \cdot 10^{-5}$
$N = 293; n = 2345$	$26.710 \cdot 10^{-5}$	$22.259 \cdot 10^{-5}$	$19.079 \cdot 10^{-5}$	$16.694 \cdot 10^{-5}$

Из результатов расчетов, приведенных в табл. 3–5, можно сделать выводы о том, что при соблюдении условий равенства масс насыпок вероятность столкновения частиц в процессе движения вдоль канала ствола будет значительно меньше, чем при соблюдении условия равенства количества частиц в насыпках. Полученные результаты дают возможность прогнозировать равномерность наложения слоев облицовки в зависимости от количества частиц, их размера и массы насыпок.

Заключение. В результате проведенных теоретических исследований получена зависимость, дающая оценку вероятности столкновения разноразмерных частиц при формировании композиционных покрытий в процессе детонационного напыления.

С помощью предлагаемого предварительного расчета можно непосредственно перед напылением обосновать технологические режимы получения покрытий на кумулятивные облицовки с необходимыми адгезионными и прочностными характеристиками.

Конкурирующие интересы. В публикации статьи отсутствуют конкурирующие финансовые или нефинансовые интересы.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и в написании рукописи. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной рукописи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Библиографический список

1. Ненашев М. В., Калашников В. В., Ибатуллин И. Д. [и др.] Оптимизация технологии нанесения детонационных покрытий на опоры буровых долот с использованием // *Изв. Самар. научн. центра РАН*, 2010. Т. 12, № 1. С. 462–466. EDN: [NDXTXD](#).

2. Калашников В. В., Деморецкий Д. А., Ненашев М. В. [и др.] Детонационный способ и технология изготовления многослойных облицовок зарядов кумулятивных перфораторов // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки*, 2011. №3(31). С. 213–218. EDN: OXTREH.
3. Патент № RU 2744805 С1: Способ нанесения реакционноспособного композиционного покрытия на основе Ni-Al / М. В. Ненашев, Д. А. Деморецкий, С. Ю. Ганигин, И. В. Нечаев, И. А. Кузнецов, А. А. Новиков, В. Л. Симогин, А. Ю. Мурзин, А. Г. Попов, А. Т. Нурмухаметов, Н. С. Альдебенев, М. С. Гречухина, И. Р. Тонеев. Патентообладатель: ФГБОУ ВО «СамГТУ». Номер заявки: 2020113997. Дата регистрации: 03.04.2020. Дата публикации: 15.03.2021, 2021. <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2744805>. EDN: XVKCSP.
4. Aly Y., Schoenitz M., Dreizin E. L. Aluminum-metal reactive composites // *Combustion Science and Technology*, 2011. vol.183, no.10. pp. 1107–1132. DOI: <https://doi.org/10.1080/00102202.2011.584090>.
5. Штерцер А. А., Ульяницкий В.Ю., Рыбин Д. К Суспензионное детонационное напыление керамических покрытий // *Физика горения и взрыва*, 2019. Т. 55, №4. С. 121–128. EDN: DPXZRY. DOI: <https://doi.org/10.15372/FGV20190416>.
6. Ulianitsky V. Yu., Dudina D. V., Shtertser A. A., Smurov I. Computer-controlled detonation spraying: Flexible control of the coating chemistry and microstructure // *Metals*, 2019. vol.9, no.12, 1244. EDN: IRTUWE. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9121244>.
7. Батраев И. С., Рыбин Д. К., Ульяницкий В. Ю. Параметры детонации смесей, создаваемых при инъекции газовых компонентов в ствол импульсного газодетонационного аппарата // *Физика горения и взрыва*, 2021. Т. 57, №1. С. 27–33. EDN: WXKKTG. DOI: <https://doi.org/10.15372/FGV20210103>.
8. Батраев И. С., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю. Ускорение дисперсных частиц продуктами газовой детонации в расширяющемся канале // *Физика горения и взрыва*, 2021. Т. 57, №5. С. 86–95. EDN: XLPYRN. DOI: <https://doi.org/10.15372/FGV20210508>.
9. Ulianitsky V. Yu., Shtertser A. A., Batraev I. S., Rybin D. K. Fabrication of layered ceramic-metal composites by detonation spraying // *Ceramics Intern.*, 2020. vol.46, no.17. pp. 27903–27908. EDN: PAVTPA. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.225>.
10. Rybin D. K., Batraev I. S., Dudina D. V., Ukhina A. V., Ulianitsky V. Yu. Deposition of tungsten coatings by detonation spraying // *Surf. Coat. Technol.*, 2021. vol.409, 126943. EDN: EUTKJS. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126943>.
11. Ганигин С. Ю., Гречухина М. С., Нечаев А. С., Мурзин А. Ю., Воронцова В. А. Математическое прогнозирование вероятности столкновения частиц в процессе детонационного напыления // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2022. Т. 26, №4. С. 789–801. EDN: FPLFZP. DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu1975>.
12. Nechaeva I., Nechaev A. Method of assessing the sensitivity of the dust-air mixture to thermal effects caused by electric discharge / *2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*, 2019. pp. 553–557. EDN: DMELHU. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSCMP45713.2019.8976612>.
13. Зенина М. В. Производство металлических порошков (гранул) для сырьевого обеспечения аддитивных технологий в машиностроении // *Технология легких сплавов*, 2015. №3. С. 32–38. EDN: UQEPYP.
14. Levi M. *Classical Mechanics with Calculus of Variations and Optimal Control: An Intuitive Introduction* / Student Mathematical Library. vol.69. Providence, RI: Amer. Math. Soc., 2014. xx+299 pp.

MSC: 80A17, 74A40

Estimation of the probability of collision of heterogeneous particles of composite powders during the formation of coatings by detonation method

S. Yu. Ganigin, M. S. Grechukhina, A. S. Nechaev

Samara State Technical University,

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation.

Abstract

The study presents the results of an assessment of the probability of collision of heterogeneous particles of composite materials when obtaining coatings by detonation on the cumulative lining of perforation systems used in the opening of oil and gas reservoirs. Due to the different properties of the initial metal powders used to produce coatings, the interaction of their particles with each other in the gas-thermal flow can lead to premature chemical reactions, which will lead to a deterioration in the strength properties of the resulting coating. Therefore, a preliminary calculation of the probability of collision of metal powder particles makes it possible to conclude about their quantitative characteristics before obtaining a coating, as well as the possible transition of interacting particles into intermetallic phases, which subsequently affect the adhesion characteristics of the coating.

Keywords: detonation spraying, particle flow, collision probability, composite materials, coating.

Received: 24th June, 2023 / Revised: 6th December, 2023 /

Accepted: 13th December, 2023 / First online: 26th December, 2023

Mathematical Modeling, Numerical Methods and Software Complexes Short Communication

© Authors, 2023

© Samara State Technical University, 2023 (Compilation, Design, and Layout)

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this article in press as:

Ganigin S. Yu., Grechukhina M. S., Nechaev A. S. Estimation of the probability of collision of heterogeneous particles of composite powders during the formation of coatings by detonation method, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2023, vol. 27, no. 4, pp. 753–764. EDN: ZOLSXS. DOI: [10.14498/vsgtu2039](https://doi.org/10.14498/vsgtu2039) (In Russian).

Authors' Details:

Sergey Yu. Ganigin  <https://orcid.org/0000-0001-5778-6516>

Dr. Techn. Sci., Associate Professor; Dean; Faculty of Engineering and Technology;

e-mail: ganigin.s.yu@yandex.ru

Maria S. Grechukhina  <https://orcid.org/0000-0001-7797-3802>

Cand. Techn. Sci.; Senior Researcher; Lab. of Digital Doubles of Materials and Technological Processes of their Processing; e-mail: mariya_grechukhina@mail.ru

Alexander S. Nechaev  <https://orcid.org/0000-0002-0939-8292>

Cand. Techn. Sci.; Associate Professor; Dept. of Radio Engineering Devices;

e-mail: nechaev-as@mail.ru

Competing interests. The publication of the article does not involve any competing financial or non-financial interests.

Authorship contribution and responsibility. All authors were involved in the development of the article concept and in writing the manuscript. The authors take full responsibility for submitting the final manuscript for publication. The final version of the manuscript was approved by all authors.

Funding. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task (theme no. AAAA12-2110800012-0).

References

1. Nenashev M. V., Kalashnikov V. V., Ibatullin I. D., et al Optimization the coating technology of detonation coverages on bases of drilling bits with use of durability power criteria, *Izv. of Samara Scientific Center of the RAS*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 462–466 (In Russian). EDN: [NDXTXD](#).
2. Kalashnikov V. V., Demoretsky D. A., Nenashev M. V., et al Detonation method and manufacturing shaped charges with multilayer liners, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Tehn. Nauki*, 2011, no. 3(31), pp. 213–218 (In Russian). EDN: [OXTREH](#).
3. *Patent RU 2744805 C1*, A method of applying a reactive composite coating based on Ni-Al / M. V. Nenashev, D. A. Demoretsky, S. Yu. Ganigin, I. V. Nechaev, I. A. Kuznetsov, A. A. Novikov, V. L. Simogin, A. Yu. Murzin, A. G. Popov, A. T. Nurmukhametov, N. S. Aldebenev, M. S. Grechukhina, I. R. Toneev; publ. 15 Mar 2021, 2021 (In Russian). <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2744805>. EDN: [XVKCSP](#).
4. Aly Y., Schoenitz M., Dreizin E. L. Aluminum-metal reactive composites, *Combustion Science and Technology*, 2011, vol. 183, no. 10, pp. 1107–1132. DOI: <https://doi.org/10.1080/00102202.2011.584090>.
5. Shtertser A. A., Ul'yanitskii V. Yu., Rybin D. K. Suspension detonation spraying of ceramic coatings, *Combust. Explos. Shock Waves*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 483–490. EDN: [QNPTKJ](#). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508219040166>.
6. Ulianitsky V. Yu., Dudina D. V., Shtertser A. A., Smurov I. Computer-controlled detonation spraying: Flexible control of the coating chemistry and microstructure, *Metals*, 2019, vol. 9, no. 12, 1244. EDN: [IRTUWE](#). DOI: <https://doi.org/10.3390/met9121244>.
7. Batraev I. S., Rybin D. K., Ul'yanitskii V. Yu. Detonation parameters of mixtures produced by injecting gaseous components into the barrel of a pulse gas detonation installation, *Combust. Explos. Shock Waves*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 23–29. EDN: [WRRYCP](#). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508221010032>.
8. Batraev I. S., Prokhorov E. S., Ul'yanitskii V. Yu. Acceleration of dispersed particles by gas detonation productions in an expanding channel, *Combust. Explos. Shock Waves*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 588–596. EDN: [HAFHKB](#). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508221050087>.
9. Ulianitsky V. Yu., Shtertser A. A., Batraev I. S., Rybin D. K. Fabrication of layered ceramic-metal composites by detonation spraying, *Ceramics Intern.*, 2020, vol. 46, no. 17, pp. 27903–27908. EDN: [PAVTPA](#). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.225>.
10. Rybin D. K., Batraev I. S., Dudina D. V., Ukhina A. V., Ulianitsky V. Yu. Deposition of tungsten coatings by detonation spraying, *Surf. Coat. Technol.*, 2021, vol. 409, 126943. EDN: [EUTKJS](#). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126943>.
11. Ganigin S. Yu., Grechukhina M. S., Nechaev A. S., Murzin A. Yu., Vorontsova V. A. Mathematical prediction of the probability of particle collisions during detonation spraying, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2022, vol. 26, no. 4, pp. 789–801 (In Russian). EDN: [FPLFZP](#). DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu1975>.

12. Nechaeva I., Nechaev A. Method of assessing the sensitivity of the dust-air mixture to thermal effects caused by electric discharge, In: *2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*, 2019, pp. 553–557. EDN: DMELHU. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSCMP45713.2019.8976612>.
13. Zenina M. V. Development of powder metallic production to supply initial materials for the mechanical engineering to satisfy needs in the field of additive technologies, *Tekhnol. Legkikh Splavov*, 2015, no. 3, pp. 32–38 (In Russian). EDN: UQEPYP.
14. Levi M. *Classical Mechanics with Calculus of Variations and Optimal Control: An Intuitive Introduction*, Student Mathematical Library, vol.69. Providence, RI, Amer. Math. Soc., 2014, xx+299 pp.