

УДК 621.453

**А. А. Обросов**, соискатель, Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
**Е. С. Земерев**, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
**В. И. Малинин**, доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## ДИНАМИКА ГАЗОНАСЫЩЕНИЯ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В СИСТЕМЕ ПОДАЧИ УСТАНОВКИ СИНТЕЗА НАНООКСИДА

*Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию динамики процесса предварительного газонасыщения порошка алюминия в системе подачи для последующего стабильного его истечения из струйной форсунки установки синтеза наноксидов. Получены формулы для расчета переходных процессов газонасыщения. Приведена методика экспериментального исследования этих процессов. Расчеты переходных процессов газонасыщения хорошо сходятся с результатами эксперимента.*

**Ключевые слова:** порошок, газонасыщение, фильтрация.

Для получения нанопорошка оксида алюминия методом сжигания алюминиево-газовой смеси требуется устойчивая подача исходного порошка с необходимым расходом в форкамеру установки [1, 2].

Подача порошковых материалов достаточно хорошо разработана и применяется в промышленности [3, 4]. Рабочий процесс системы подачи порошка, перемещение и истечение его из выпускного отверстия осуществляется за счет объемных сил сжатого газа [5]. Однако в научно-технической литературе нет достаточно полной и подробной информации об исследовании динамики процессов газонасыщения порошка и фильтрации газа при газонасыщении [4].

Исследование динамики газонасыщения проводилось на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

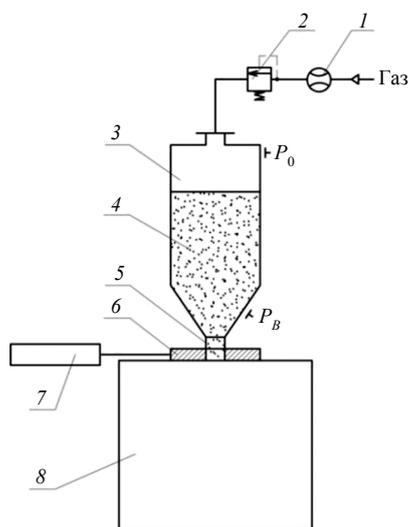


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – расходомер газа; 2 – отсекающий клапан; 3 – емкость с порошком; 4 – порошок алюминия; 5 – сменная форсунка; 6 – отсекающее устройство форсунки; 7 – привод отсекающего устройства; 8 – приемная емкость

Порошок алюминия засыпался в емкость 3 и уплотнялся до плотности  $\rho \approx 1800 \text{ кг/м}^3$ . Уплотненный

в емкости порошок представляет собой порошковый элемент (ПЭ). Газонасыщение производили при давлении газа  $P_0$  через торец ПЭ при закрытом выпускном отверстии. Вдоль порошкового элемента распространяется волна давления. Через некоторое время передний фронт волны давления достигает торца ПЭ, примыкающего к отсекающему клапану 6 форсунки 5. Давление газа перед клапаном  $P_B$  постепенно растет пока не достигнет величины, равной давлению  $P_0$ . Система подачи подготовлена к пуску. Открытие выпускного отверстия форсунки обеспечивает истечение сжатого газа и транспортируемого им порошка. Таким образом, в процессе предварительного газонасыщения заполняется объем пор ПЭ по давлению  $P_0$ , т. е. запасается энергия сжатого газа, которая будет затрачена на транспортировку и истечение частиц порошка.

Эксперименты показали, что запаса газа, предварительно закаченного в ПЭ, недостаточно для стабильной подачи порошка, и требуется дополнительный расход газа, который фильтруется через ПЭ, также истекает с предварительно закаченным газом. В процессе фильтрации газа на ПЭ создается перепад давления  $\Delta P = P_0 - P_B$ . Следовательно, процесс газонасыщения можно разделить на два этапа:

- предварительное газонасыщение ПЭ при закрытом выпускном отверстии;
- поддерживающее газонасыщение в процессе истечения порошка и газа из выпускного отверстия.

Переходный процесс пуска системы подачи ПЭ определяется временем его предварительного газонасыщения, поэтому метод расчета динамики указанного процесса представляет важную задачу. Подвергнем описанный выше процесс предварительного газонасыщения следующей схематизации. Примем, что:

- а) давление газа  $P_0$  на торце ПЭ набирается мгновенно;
- б) температура  $T$  газа и ПЭ равны;
- в) деформации в ПЭ отсутствуют;
- г) режим течения газа в порах ПЭ ламинарный;
- д) процесс фильтрации одномерный;

е) газонасыщение считается законченным, если  $\frac{P_0 - P_B}{P_0} \leq 0,05$ .

Таким образом, полагаем, что предварительное газонасыщение является процессом одномерной изотермической нестационарной фильтрации газа в пористой среде, описываемой уравнением [5] Буссинеска в виде

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{2\varepsilon\mu} \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $x$  – координата вдоль оси ПЭ (за  $x = 0$  принят торец ПЭ с давлением  $P_0$ );  $k$  – коэффициент газопрооницаемости;  $\varepsilon$  – порозность ПЭ;  $\mu$  – вязкость газа.

Найдем решение уравнения (1), приведя его к параболическому типу:

$$\frac{\partial P^2}{\partial t} = \frac{kP}{\varepsilon\mu} \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}. \quad (2)$$

В первом приближении при условии  $\Delta P \ll P_0$  можно положить  $kP \approx kP_0$ , тогда уравнение (2) будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial P^2}{\partial t} = \frac{kP_0}{\varepsilon\mu} \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Будем искать решение уравнения (3) для случая, когда фронт волны давления не достиг противоположного торца ПЭ ( $x = L$ ), исходя из удовлетворения начальных и граничных условий:

$$P(x, 0) = 0 \text{ – начальное условие;} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P(0, t) &= P_0 \\ \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=L, t=0} &= 0 \text{ – граничные условия.} \end{aligned} \quad (5)$$

Решение уравнения (3) с начальными (4) и граничными (5) условиями будем искать в виде параболической зависимости с разделенными переменными  $x$  и  $t$ :

$$P(x, t) = a + bx + cx^2, \quad (6)$$

где  $a, b, c$  – функции времени, которые можно найти, решая систему уравнений (4), (5) и (6). Получим:

$$a = P_0, \quad b = -\frac{2P_0}{X(t)}, \quad c = \frac{P_0}{X(t)^2},$$

где  $X$  – условная длина ПЭ в момент времени  $t$  (от  $x = 0$  до координаты переднего фронта волны давления).

Решение уравнения (3) имеет вид

$$P(x, t) = P_0 - \frac{2P_0}{X}x + \frac{P_0}{X^2}x^2. \quad (7)$$

Функцию  $X$  определим подстановкой (7) в уравнение (1):

$$\int_0^x \frac{\partial P}{\partial t} dx = \frac{k}{2\varepsilon\mu} \int_0^x \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} dx. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) относительно  $X$ , получим:

$$X = \sqrt{\frac{12kP_0t}{\varepsilon\mu}}. \quad (9)$$

Окончательно уравнение (7) для  $x \leq X$  имеет вид

$$P(x, t) = P_0 \left( 1 - \frac{2x\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{12kP_0t}} + \frac{x^2\varepsilon\mu}{12kP_0t} \right). \quad (10)$$

Время распространения переднего фронта волны давления можно определить из формулы (9):

$$t = \frac{\varepsilon\mu X^2}{12kP_0}. \quad (11)$$

Найдем решение уравнения фильтрации (3) для случая когда передний фронт волны давления достиг противоположного торца ПЭ, т. е. когда  $t \geq \tau$ , где

$$\tau = \frac{\varepsilon\mu L^2}{12kP_0}.$$

Начальные условия:

$$P(x, t) = P_0 \left( 1 - \frac{2x}{L} + \frac{x^2}{L^2} \right). \quad (12)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} P(0, t) &= P_0, \\ \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=L} &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Решением будет функция

$$P(x, t) = P_0 \left[ 1 - \frac{x}{L} \left( 2 - \frac{x}{L} \right) e^{\frac{t-\tau}{T_p}} \right], \quad (14)$$

где  $T_p$  – время релаксации.

Время релаксации определим, подставив (14) в (1):

$$T_p = \frac{\varepsilon\mu L^2}{3kP_0}. \quad (15)$$

Окончательно функция, описывающая динамику процесса предварительного газонасыщения ПЭ при закрытом выпускном отверстии, имеет вид

$$P(x, t) = P_0 \left[ 1 - \frac{x\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{12kP_0t}} \left( 2 - \frac{x\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{12kP_0t}} \right) \right]$$

$$\text{при } 0 < t \leq \tau = \frac{\varepsilon\mu L^2}{12kP_0}; \quad (16)$$

$$P(x,t) = P_0 \left[ 1 - \frac{x}{L} \left( 2 - \frac{x}{L} \right) e^{\frac{t-\tau}{T_p}} \right] \text{ при } t \geq \tau. \quad (17)$$

Для определения величины и характера изменения удельного (на единицу площади сечения) расхода фильтрующегося газа про дифференцируем по  $x$  выражения (16) и (17):

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{2P_0\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{12kP_0t}} + \frac{2\varepsilon\mu P_0}{12kP_0t} x; \quad (18)$$

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{2P_0}{L} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) e^{\frac{t-\tau}{T_p}}. \quad (19)$$

Подставим (18) и (19) в закон фильтрации Дарси  $\left( g_\phi = -\frac{kP_0}{\mu RT} \frac{dP}{dx} \right)$ , получим уравнение для определения удельного расхода фильтрующегося газа:

$$g_\phi = \begin{cases} \frac{2kP_0^2}{\mu RT} \left( \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{12kP_0t}} - \frac{\varepsilon\mu}{12kP_0t} x \right) & \text{при } 0 < t \leq \tau, \\ \frac{2kP_0^2}{\mu RT L} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) e^{\frac{t-\tau}{T_p}} & \text{при } t \geq \tau. \end{cases} \quad (20)$$

Здесь  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости газа;  $R$  – газовая постоянная.

Можно проверить правильность полученных выражений (11), (15), (16), (17), (18) и (19) исходя из следующего. Если определить суммарную массу газа, прошедшего через торец ПЭ ( $x = 0$ ) в интервале времени от  $t = 0$  до  $t = \infty$ , то она должна быть равна  $m = \frac{P_0 V_\varepsilon}{RT}$ , где  $V$  – объем порошкового элемента ( $V = L \cdot S$ ,  $S$  – площадь поперечного сечения ПЭ).

Суммарную массу газа определим интегрированием уравнения (20):

$$m' = \int_0^\tau g_\phi S dt = \frac{2S}{RT} \sqrt{\frac{\varepsilon k P_0^2}{3\mu}} \tau; \quad (21)$$

$$m'' = \int_\tau^\infty g_\phi S dt = \frac{2SkP_0^2 T_p}{\mu RT L}. \quad (22)$$

Если подставить в уравнения значения  $\tau$  и  $T_p$ , то получим:

$$m_\varepsilon = m' + m'' = \frac{P_0 V_\varepsilon}{RT}. \quad (23)$$

Совпадение полученной массы газа свидетельствует о правильности полученных уравнений распределения давления и расхода газа при предварительном газонасыщении.

Для проверки полученных уравнений динамики процесса предварительного газонасыщения ПЭ были проведены эксперименты. На рис. 2 приведены ре-

зультаты расчета переходного процесса изменения давления  $P_B$  на торце ПЭ, примыкающего к закрытому выпускному отверстию (прерывистая линия), и результаты эксперимента (сплошная линия). При расчетах параметры порошкового элемента и газа принимались равными:  $L = 0,83$  м,  $S = 20,8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,34$ ,  $k = 0,82 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>,  $T = 300$  К,  $R = = 29,3$  Дж/(моль·К),  $P_0 = 2 \cdot 10^6$  Па,  $\mu = 1,84 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

Параметры ПЭ и газа в эксперименте соответствовали вышеприведенным. Совпадение кривых, приведенных на рис. 2, указывает на сходимость результатов расчета с экспериментом.

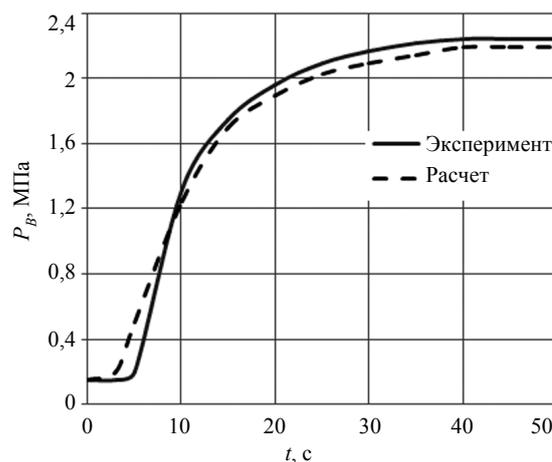


Рис. 2. Процесс изменения давления газа в порошковом элементе перед выпускным отверстием

### Выводы

1. Расчеты переходных процессов газонасыщения хорошо согласуются с результатами эксперимента, что указывает на адекватность используемой математической модели.

2. Процесс газонасыщения происходит достаточно длительное время (20...30 с) и для его сокращения требуется разработка других способов насыщения газом ПЭ.

### Библиографические ссылки

1. *Малинин В. И.* Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. – Екатеринбург; Пермь: УрО РАН, 2006. – 262 с.

2. Получение СВС-оксидов и нитридов в газе / В. И. Малинин, Е. И. Коломин, И. С. Антипин, А. А. Обросов // Научно-технические разработки в области СВС: справочник; под общ. ред. акад. А. Г. Мерджанова. – Черноголовка: ИСМАН, 1999. – С. 149–151.

3. *Островский Г. М.* Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.

4. *Малис А. Я.* Пневматический транспорт сыпучих материалов при высоких концентрациях. – М.: Машиностроение, 1969. – 178 с.

5. Переход горения конденсированных систем во взрыв / А. Ф. Беляев, В. К. Боболев, А. И. Корешков [и др.]. – М.: Наука, 1973. – С. 68.

A. A. Obrosova, Applicant, Perm National Research Polytechnic University

E. S. Zemerev, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University

V. I. Malinin, DSc in Engineering, Professor, Perm National Research Polytechnic University

### Dynamics of Aluminum Powder Gas Saturation in Feeder System of Nanooxide Synthesis Plant

*The work is devoted to theoretical and experimental study of the dynamics of the process of preliminary gas saturation of aluminum powder in the supply system for its further stable flowing out of the inkjet nozzle of the nanooxide synthesis plant. Formulas for calculation of transient gas saturation processes have been obtained. The technique of experimental study of these process has been shown. Calculations of transient gas saturation processes agree well with experimental results.*

**Key words:** powder, gas saturation, filtration.

УДК 621.914.6

**В. А. Иванов**, доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**В. К. Перевозников**, кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## МЕТОД БЛОКИРУЮЩИХ ЛИНИЙ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*Предложен метод блокирующих линий при нахождении параметров установки дисковых инструментов, обрабатывающих сложнопрофильные винтовые поверхности. Проведен анализ формы графиков блокирующих линий в зависимости от вида заданного профиля винтовой поверхности. Представлены результаты исследований влияния диаметра инструментов на форму блокирующих линий и ограничений на выбор параметров установки.*

**Ключевые слова:** параметры винтовых поверхностей, параметры установки, блокирующие линии.

**В**интовые поверхности (ВП) широко используются в конструкциях деталей машин и металлообрабатывающих инструментов. Работоспособность изделий с ВП в значительной степени определяется качеством формообразования. Правильная форма ВП зависит в основном от профиля дискового инструмента (ДИ) и его установки при обработке. Особую трудность представляет обработка ВП стружечных канавок режущих инструментов, которые в отличие от деталей машин имеют более сложный несимметричный и обычно поднутренный профиль, очерченный несколькими сопряженными или пересекающимися участками различных линий: дугами окружностей, прямыми линиями, архимедовой спиралью и пр. При этом на профиле ВП не допускаются подрезание и образование переходных кривых несоответствующих размеров, что является погрешностью обработки ВП. Для предупреждения погрешностей необходимо правильно выбрать параметры установки (ПУ) инструмента:  $a_w$  – межосевое расстояние детали и ДИ;  $\varepsilon$  – угол скрещивания между положительным направлением оси детали и отрицательным направлением оси ДИ (межосевой угол);  $\psi$  – угол поворота торцового профиля детали относительно линии межосевого перпендикуляра. Поэтому определение или поиск параметров установки, а также их оптимизация относительно осей координат ВП остается актуальной научно-технической задачей.

### Постановка задачи

В настоящее время определение ПУ инструмента относительно детали, а также выбор наружного диаметра инструмента, решаются как при прямой, так и обратной задаче профилирования дисковых инструментов при формообразовании винтовых поверхностей [1].

Предлагаемый метод блокирующих линий для нахождения ПУ дисковых инструментов при формообразовании винтовых поверхностей [2, 3] является универсальным, пригоден для любого профиля ВП, позволяет совмещать расчеты различных профилей деталей с отысканием оптимальных ПУ дисковых инструментов для их обработки. Он позволяет расширить технологические возможности профилирования дисковых инструментов при формообразовании ВП. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выявить параметры ВП, оказывающие наибольшее влияние на поиск оптимальных параметров установки.

2. Проанализировать влияние конструктивных параметров дисковых инструментов на форму блокирующих линий и ограничений на выбор ПУ и профиль ИИП, а также найти такие размеры профиля ВП, которые обеспечивали бы ее полную обработку без подрезов, недорезов и образования переходных кривых.