

УДК 669.621.694

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНОЙ КАМЕРЫ ИНЖЕКТОРА ДЛЯ ПНЕВМОТРАНСПОРТА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Седуш В.С., аспирант

Донецкий национальный технический университет

*Исследован характер взаимодействия газовой струи со средой аэрированного материала. Получены теоретические зависимости для определения оптимальных геометрических параметров приемной камеры инжектора для пневмотранспорта порошковых материалов.*

*The character of interaction of a gas jet with a aeration material is investigated. Are obtained of theoretical equation for definition of optimum geometric parameters of the receiving camera of injector for pneumotransport of powder materials.*

**Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.** Одним из наиболее экономичных способов повышения качества продукции в условиях металлургического производства является внепечная обработка расплавленного металла, для проведения которой в настоящее время широко используются инъекционные системы, оборудованные пневмотранспортными установками (ПТУ) для инжектирования (ввода) порошковых реагентов в расплав газом. Основным узлом, который определяет технико-экономические показатели работы ПТУ, является питатель материалов. Он должен удовлетворять следующим основным требованиям: обеспечивать высокую точность дозирования порошков и равномерность подачи их по пневмотранспортному трубопроводу в продувочное устройство, а также обладать широким диапазоном регулирования производительности. Современные ПТУ инъекционных систем оснащаются пневмомеханическими или пневматическими питателями. Пневмомеханические питатели обеспечивают необходимую точность дозирования порошков и регулирование их расхода в широких пределах, но они весьма громоздки и конструктивно сложны, а наличие в них вращающихся рабочих органов снижает безотказность в эксплуатации. Этих недостатков лишены пневматические питатели аэрационного типа. Однако в сравнении с пневмомеханическими питателями они весьма чувствительны к пульсациям давления газа в пневмотранс-

портном трубопроводе, что не позволяет им обладать достаточной точностью дозирования порошков и равномерностью выдачи их в продувочное устройство.

**Анализ исследований и публикаций.** Точность дозирования большинства конструкций аэрационных питателей, работающих в составе ПТУ инъекционных систем обычно не превышает 5-10% [1,2]. В работе [3] предложена конструкция аэрационного питателя, которая обеспечивает точность дозирования материала и равномерность его выдачи питателем на уровне 0,5%. В основу предложенной конструкции питателя заложен струйный аппарат (инжектор) для инжектирования твердых материалов в пневмотранспортный трубопровод. Основными геометрическими параметрами, определяющими конструкцию инжектора (рисунок 1), являются: диаметры сопла  $d_1$ , камеры смешения  $d_2$ , приемной камеры  $D$ ; расстояние сопла от начала камеры смешения  $L$  и ее длина  $l$ , а также половинный угол раскрытия конфузора  $\alpha_1$ . Геометрические размеры приемной камеры определяют параметры  $L$  и  $D$ .

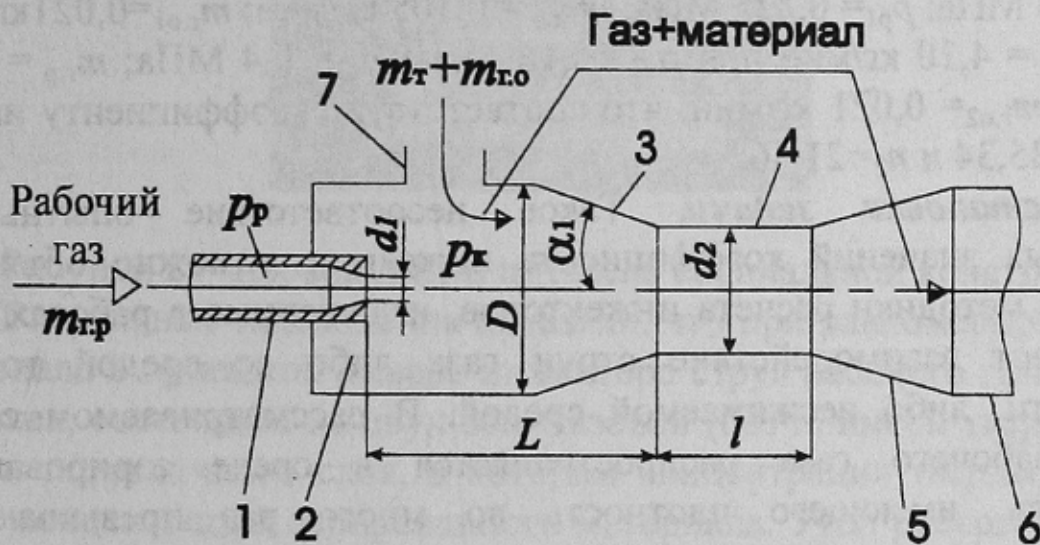


Рисунок 1 – Схема струйного аппарата для инжектирования порошка твердого материала в пневмотранспортный трубопровод:

1-рабочее сопло ; 2-приемная камера; 3-конфузор; 4-камера смешения; 5-диффузор; 6-пневмотранспортный трубопровод; 7-загрузочное отверстие.

На рисунке 1 обозначено:  $m_t$  – массовый расход твердого материала (производительность питателя);  $m_{т.о}$  – массовый расход аэрирующего газа в дозирующем отверстии;  $m_{т.р}$  – массовый расход рабочего газа;  $p_k$  – давление газа в приемной камере инжектора;  $p_p$  – давление рабочего газа перед соплом.



В работах [4,5] изложены методы расчетов геометрических параметров инжекторов при постоянном коэффициенте инъекции  $n=(m_T+m_{г.о})/m_{г.р}$ . Согласно данным методикам для коэффициента инъекции  $n=10$  (что соответствовало максимальной производительности питателя  $m_{г.мах}=1$  кг/мин) были рассчитаны геометрические параметры инжектора для питателя порошковых материалов, значения которых составили:  $d_1=2,1$  мм;  $d_2=10$  мм;  $D=30$  мм;  $L=65$  мм ( $\alpha_1=45^\circ$ ). На основе рассчитанных значений была изготовлена конструкция опытного питателя и проведены лабораторные исследования [6], в которых в качестве твердого материала использовался кварцевый песок (эквивалентный диаметр частиц  $d_3=0,2$  мм; истинная плотностью  $\rho_{тв}=2670$  кг/м<sup>3</sup>; насыпная плотность  $\rho_{нас}=1670$  кг/м<sup>3</sup>), а в качестве газа – осушенный воздух, температура которого во время исследований составляла  $T=303$  К.

В результате исследований было установлено, что максимальная производительность питателя, при которой обеспечивалась стабильная выдача материала инжектором, составила:  $m_{г.мах1}=3,69$  кг/мин при  $p_{н1}=0,14$  МПа;  $p_{р1}=0,225$  МПа;  $m_{г.р1}=0,105$  кг/мин;  $m_{г.о1}=0,021$  кг/мин; и  $m_{г.мах2}=4,10$  кг/мин при  $p_{н2}=0,16$  МПа;  $p_{р2}=0,4$  МПа;  $m_{г.р}=0,192$  кг/мин;  $m_{г.о2}=0,021$  кг/мин, что соответствует коэффициенту инъекции  $n_1=35,34$  и  $n_2=21,46$ .

**Постановка задачи.** Такое несоответствие опытных и расчетных значений коэффициента инъекции  $n$  можно объяснить тем, что методики расчета инжекторов, изложенные в работах [4,5], учитывают взаимодействие струи газа либо со средой той же плотности, либо несжимаемой средой. В рассматриваемом случае струя рабочего газа распространяется в среде аэрированного материала, имеющего плотность во много раз превышающую плотность газа в струе и одновременно обладающей упругими свойствами. Поэтому такое взаимодействие струи рабочего газа со средой требует дополнительных исследований, которые до настоящего времени практически не проводились.

**Изложение материала и результаты.** Для изучения процесса взаимодействия струи рабочего газа со средой аэрированного материала был изготовлен лабораторный аэрационный питатель специальной конструкции (рисунок 2) с расходным бункером, разделенным на две части. В нижней части бункера располагалась приемная камера струйного аппарата, в которую через дозирующие отверстия в боковых стенках поступал аэрированный материал. Верхняя и нижняя

часть приемной камеры были выполнены из прозрачного материала (органического стекла), что позволяло наблюдать и фотографировать картину взаимодействия струи рабочего газа с материалом. Сопло рабочего газа было подвижным, что позволяло регулировать его расстояние от начала камеры смешения  $L$ .

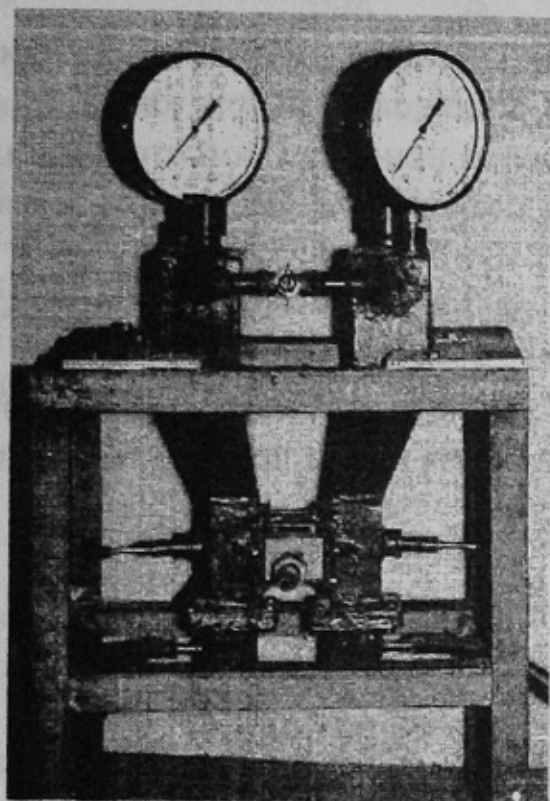


Рисунок 2 – Аэрационный питатель специальной конструкции.

Визуальные наблюдения показали, что при равномерной выдаче материала в приемной камере инжектора струя рабочего газа образует факел, состоящий из двух зон: газовой (без примеси твердых частиц) и пограничного слоя, в котором концентрация твердых частиц ниже концентрации аэрированного материала. Угол раскрытия струи рабочего газа при этом составляет  $2\varphi = 40 \pm 2^\circ$ , что весьма близко совпадает с результатами исследований посвященных изучению истечения газовой струи в неподвижный и псевдооживленный слой зернистого материала [7,8]. Здесь следует отметить, что установленный угол раскрытия струи почти в 2 раза больше в сравнении со свободной струей газа, распространяющейся в среде той же плотности, для которой  $2\varphi \cong 20^\circ$  [5].

При изменении положения сопла от начала камеры смешения равномерная выдача материала питателем наблюдалась в случае, если газовая зона факела входит в камеру смешения. Так как количество



инжектированного материала при этом изменяется в 1,5-2 раза, то параметр  $L$  требует оптимизации. В качестве критерия оптимизации может быть принято условие равномерной работы питателя при обеспечении требуемой его производительности.

Оптимальное значение  $L$  можно установить, приняв следующие допущения:

- при наличии пограничного слоя, присоединение материала к газовой струе завершается при касании наружной границы пограничного слоя неподвижной стенки инжектора;
- скорости твердых частиц материала и газа в пограничном слое равны;
- скорость газа на внешней границе пограничного слоя равна нулю.

Согласно этому, расчетная схема струи рабочего газа в приемной камере инжектора будет иметь вид изображенный на рисунке 3.

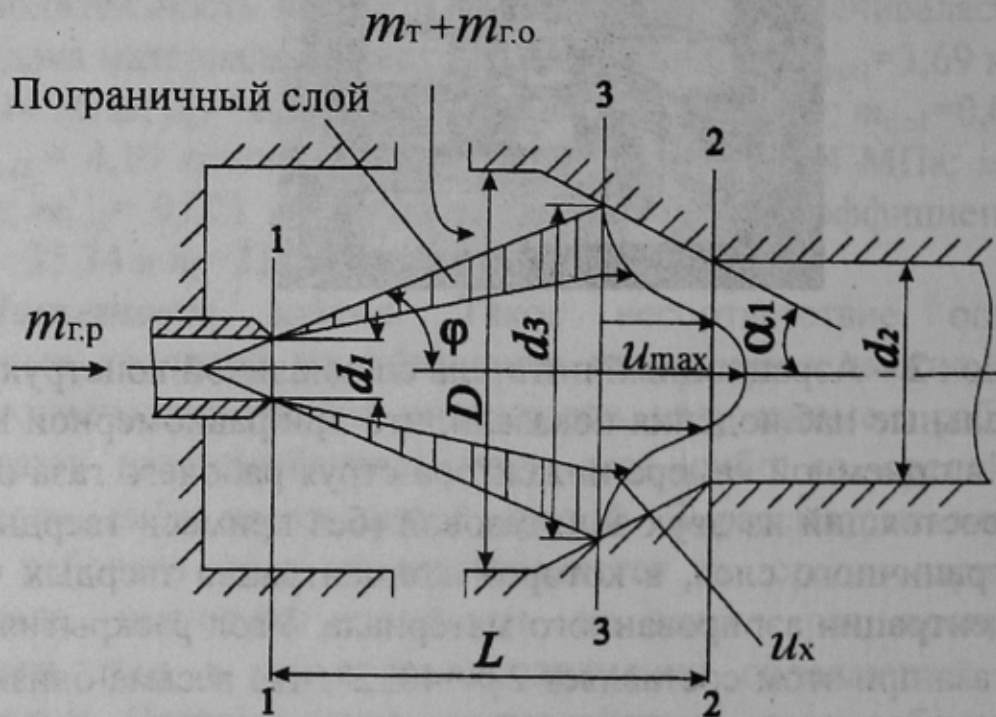


Рисунок 3 – Расчетная схема струи рабочего газа.

Известно, что теоретическое исследование турбулентных струй газа, в состав которых входит примесь твердых частиц, является исключительно сложной задачей [9]. В случае истечения струи рабочего газа в слой неподвижного и псевдооживленного материала, решение данной задачи становится возможным, если провести осреднение характеристик турбулентного потока [7,8].

В этом случае, для слоя азрированного материала согласно [7] примем, что средняя скорость газа в сечении 3-3 для горизонтальной струи газа составляет  $u_{\text{ср}} = 0,5u_{\text{max}}$ , а максимальная скорость газа  $u_{\text{max}}$  на ее оси определяется зависимостью

$$u_{\text{max}} = \frac{d_1 u_1}{0,366 d_3} \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_{\text{ср}}}}, \quad (1)$$

где  $u_1$  – скорость рабочего газа на выходе из сопла;  $\rho_k$  – плотность газа в приемной камере инжектора;  $\rho_{\text{ср}}$  – средняя плотность струи в сечении 3-3 инжектора.

При осредненных параметрах потока, массовый расход смеси в сечении 3-3 определится уравнением

$$m_{\text{см}} = u_{\text{ср}} \rho_{\text{ср}} \frac{\pi d_3^2}{4}, \quad (2)$$

где  $m_{\text{см}} = m_{\text{т}} + m_{\text{г.о}} + m_{\text{г.р}}$ .

Выражая среднюю плотность  $\rho_{\text{ср}}$  из уравнения (2) и подставляя его в зависимость (1), с учетом  $u_{\text{ср}} = 0,5u_{\text{max}}$  можно получить следующую зависимость для определения средней скорости струи в сечении 3-3

$$u_{\text{ср}} = \left( \frac{d_1 u_1}{0,732} \right)^2 \frac{\pi \rho_k}{4 m_{\text{см}}}. \quad (3)$$

Известно [9], что стабильная работа пневмотранспортных систем обеспечивается в случае, когда скорость газа в любом сечении канала (трубопровода) выше либо равна скорости взвешенного пневмотранспорта частиц материала  $u_{\text{г.мин}}$ , т.е.  $u_{\text{ср}} \geq u_{\text{г.мин}}$ . Минимальную скорость взвешенного пневмотранспорта частиц материала  $u_{\text{г.мин}}$  для сечения 3-3 инжектора установим на основе зависимости, предложенной в работе [9]

$$u_{\text{г.мин}} = 1,23 \sqrt{\frac{4 g d_3 u_{\text{вит}} W}{\beta (2 \xi_1 + \beta \xi_2 W)}}, \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $u_{\text{вит}}$  – скорость витания частиц в газе;  $W = m_{\text{т}} / (m_{\text{г.р}} + m_{\text{г.о}})$  – массовая концентрация потока смеси;

$\xi_1$  – коефіцієнт опору чистого газу о тверду стінку;  $\beta$  і  $\xi_2$  – опытні коефіцієнти, рівні відповідно 0,3 і 0,0036.

Тоді на основі (3) і (4) отримаємо наступну залежність для визначення діаметра струї  $d_3$  в точці її касання со стінкою інжектора

$$d_3 = \left( \left( \frac{d_1 u_1}{0,732} \right)^2 \frac{\pi \rho_k}{4,8 m_{cm}} \right)^3 \frac{\beta (2\xi_1 + \beta \xi_2 W)}{g u_{вит} W}. \quad (5)$$

Для забезпечення потрібного діаметра струї  $d_3$ , необхідне відстання сопла від початку камери зміщення  $L$  (см. рисунок 3) повинно складати

$$L = 0,5 \left( \frac{d_3 - d_1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{d_3 - d_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right), \quad (6)$$

де  $\varphi$  – половинний кут відкриття струї робочого газу (факела) в прийомній камері інжектора.

В разі якщо  $d_3 < d_2$ , то друге слагаєме в правій частині залежності (6) при розрахунку відстані  $L$  враховувати не повинно.

Оптимальне значення діаметра прийомної камери  $D$  визначається умовою нестесненого руху струї робочого газу в прийомній камері інжектора, яке згідно [10] може бути представлено в вигляді

$$D \geq 16d_1. \quad (7)$$

В протилежному разі в прийомній камері виникає циркуляційне рухання матеріалу, яке порушує стабільність видачі матеріалу і призводить до інтенсивному абразивному износу стінок прийомної камери.

При використанні опытної конструкції палача в промислових дослідженнях технології сульфидирования і десульфурации чугуна порошковими реагентами (серою і содою) в індукційній печі ІСТЧ-0,2, установленій в електросталеплавильному цеху ОАО «Константиновський завод «ВТОРМЕТ», оптимальні значення



параметров  $L$  и  $D$ , определенные по зависимостям (5)-(7), составили  $L=60$  мм и  $D=30$  мм. При этом обеспечивалась равномерная и регулируемая выдача реагентов в расплав чугуна в диапазоне 1...2,5 кг/мин.

### **Выводы и направление дальнейших исследований:**

1. Лабораторные исследования процесса взаимодействия струи рабочего газа со средой азрированного материала показали, что при равномерной выдаче материала инжектором в его приемной камере струя рабочего газа образует факел, угол раскрытия которого составляет  $40 \pm 2^\circ$ .

2. Получены зависимости (5)-(7) для расчета параметров приемной камеры инжектора, обеспечивающих равномерную выдачу порошковых материалов в пневмотранспортный трубопровод, которые подтверждены результатами промышленных исследований.

3. Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальное подтверждение полученных зависимостей для порошковых материалов различной плотности и гранулометрического состава.

### Список источников:

1. Хорнберг Х., Балдин Г. Современный пневматический дозатор для установок десульфурации передельного чугуна по способу одно- и двухкомпонентного вдувания // Черные металлы.-2000.-Декабрь.-С.22-25.
2. Бабич А.И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке. – К.:Техніка, 1993.- 200 с.
3. Лифенко Н.Т., Седуш В.С., Сидоренко Г.Н. Питатели для систем пневматической подачи порошковых и зернистых материалов в металлургические расплавы // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2002.-№10.-с.151-153.
4. Соколов. Е.Я. Зингер. Н.М. Струйные аппараты - 3<sup>е</sup> изд., переработанное - М.: Энергоатомиздат, 1989.-352с.
5. Успенский. В.А, Кузнецов. Ю.М. Струйные вакуумные насосы. - М.: Машиностроение, 1973.
6. Большаков В.И., Седуш В.С., Лифенко Н.Т. Увеличение точности дозирования порошковых и пылевидных материалов пневмотранспортными установками // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2002.-№1.-с.85-87.
7. Шахова Н.А. Истечение турбулентных струй в псевдооживленный слой // Инженерно-физический журнал.-1968.- Т.14, №1.-С.61-69.
8. Шахова Н.А., Лукашев В.К. Исследование истечения газовой струи в неподвижный слой зернистого материала // Инженерно-физический журнал.-1975.- Т.29, №3.-С.397-402.
9. Кузнецов Ю.М. Камерный питатель для процессов инжекционной металлургии (эксперимент, расчет, конструкция). Производственно-техническое издание.-М.:Интермет Инжиниринг, 2000.-57с.
10. Струйные течения в рабочих камерах и смесительных устройствах.-Академия наук Эстонской ССР, 1973.-204 с.