

СЕДУШ В.С. (ДОННТУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНОЙ КАМЕРЫ АЭРАЦИОННЫХ ПИТАТЕЛЕЙ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

Исследован характер взаимодействия газовой струи со средой азрированного материала. Получены теоретические зависимости для определения оптимальных геометрических параметров приемной камеры азриционного питателя пневмотранспортных установок с газодинамическим регулированием его производительности.

Для проведения внепечной обработки металлургических расплавов, вдувания порошковых и пылевидных материалов в металлургические агрегаты и для их торкретирования широко используются пневмотранспортные установки, снабженные азриционными питателями. Такие питатели отличаются простотой конструкции и надежностью в работе, но не обладают достаточной (менее 5%) точностью дозирования материалов в широких пределах регулирования их производительности [1,2].

В работе [3] предложена конструкция азриционного питателя пневмотранспортных установок для металлургической промышленности с газодинамическим способом регулирования его производительности (только изменением расхода газа на азрирование материала в расходном бункере), которая обеспечивает точность дозирования материала питателем 0,5% в диапазоне регулирования производительности 1...4 раза.

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 α_1 . Геометрические размеры приемной камеры определяют параметры L и D . Так как при газодинамическом способе регулирования производительности питателя, данные параметры являются постоянными и должны обеспечивать стабильную и равномерную выдачу материала в пневмотранспортный трубопровод во всем диапазоне регулирования производительности питателя, то необходима их оптимизация.

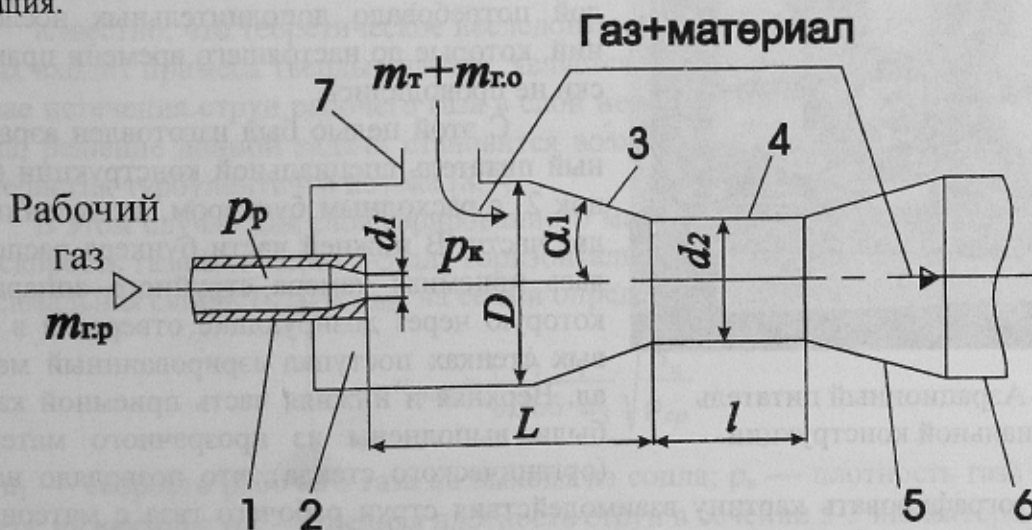


Рис. 1. Схема струйного аппарата для инжектирования порошка твердого материала в пневмотранспортный трубопровод: 1 — рабочее сопло; 2 — приемная камера; 3 — конфузор; 4 — камера смешения; 5 — диффузор; 6 — пневмотранспортный трубопровод; 7 — загрузочное отверстие

На рисунке 1 обозначено: m_T — массовый расход твердого материала (производительность питателя); $m_{г.о}$ — массовый расход аэрирующего газа в дозирующем отверстии; $m_{г.р}$ — 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 инжекции $n=(m_T+m_{г.о})/m_{г.р}$. Согласно данным методикам для коэффициента инжекции $n=10$ (что соответствовало максимальной производительности питателя $m_{T,max}=1$ 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 лабораторных исследованиях в качестве твердого материала использовался кварцевый песок с эквивалентным диаметром частиц $d_3=0,2$ мм и плотностью $\rho_{тв}=2670$ кг/м³ (насыпная плотность $\rho_{нас}=1670$ кг/м³). В качестве газа использовался воздух, температура которого во время исследований составляла $T=303$ К.

В результате исследований установлено, что максимальная производительность питателя, при которой обеспечивалась стабильная выдача материала инжектором, составила: $m_{T,max1}=3,69$ 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 $m_{T,max2}=4,10$ 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 инжекции $n_1=35,34$ и $n_2=21,46$.

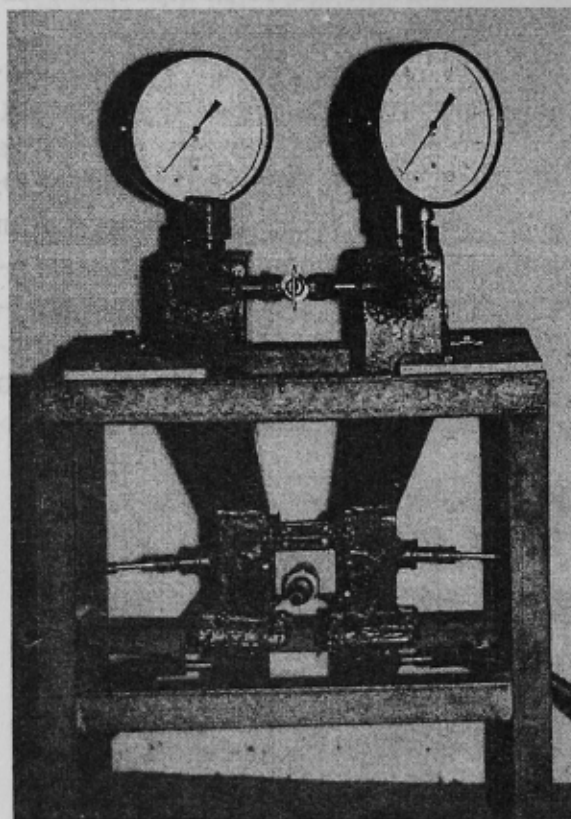


Рис. 2. Аэрационный питатель специальной конструкции

С этой целью был изготовлен 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 .

Визуальные наблюдения показали, что при стабильной выдаче материала в приемной камере инжектора струя рабочего газа образует факел, состоящий из двух зон:

Такое несоответствие опытных и расчетных значений коэффициента инжекции 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. Такое взаимодействие струи рабочего газа со средой потребовало дополнительных исследований, которые до настоящего времени практически не проводились.

С этой целью был изготовлен 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.

газовой (без примеси твердых частиц) и пограничного слоя, в котором концентрация твердых частиц ниже концентрации азрированного материала. При изменении положения сопла от начала камеры смешения стабильная выдача материала питателем наблюдалась в случае, если газовая зона факела входит в камеру смешения. Так как количество инжесрированного материала при этом изменяется в 1,5–2 раза, то в качестве критерия оптимизации при определении параметра L принято условие стабильной 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 инжесктора;
- 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 инжесктора будет иметь вид изображенный на рисунке 3.

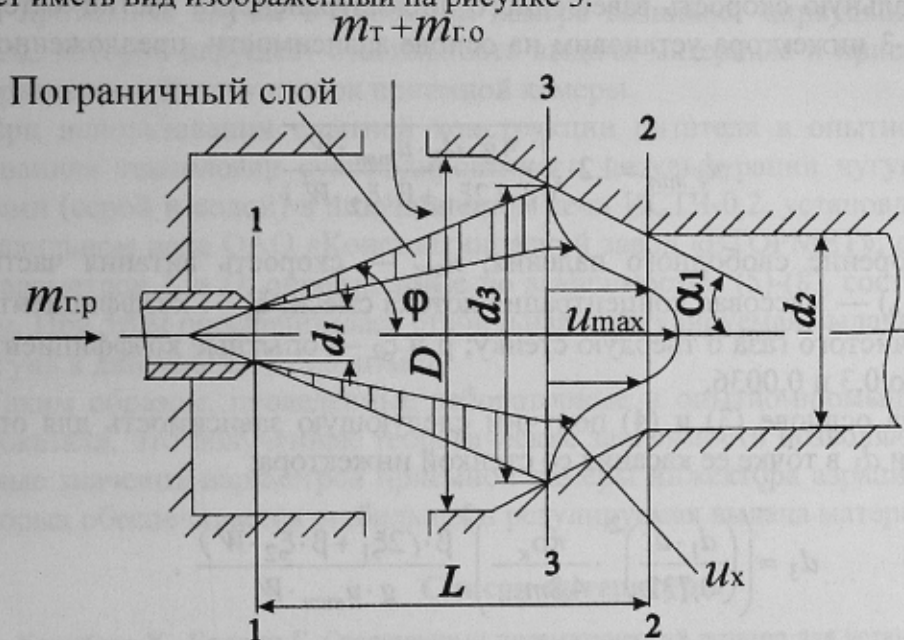


Рис. 3. Расчетная схема струи рабочего газа

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

В этом случае для слоя азрированного материала согласно [8] примем, что средняя скорость газа в сечении 3-3 для горизонтальной струи газа составляет $u_{ср} = 0,5u_{max}$, а максимальная скорость газа u_{max} на ее оси определяется зависимостью:

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

где u_1 — скорость рабочего газа на выходе из сопла; $\rho_{к}$ — плотность газа в приемной камере инжесктора; $\rho_{ср}$ — средняя плотность струи в сечении 3-3 инжесктора.

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

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

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

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

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

Известно [7], что стабильная работа пневмотранспортных систем обеспечивается в случае, когда скорость газа в любом сечении канала (трубопровода) выше либо равна скорости взвешенного пневмотранспорта частиц материала $u_{г.мин}$, т.е. $u_{ср} \geq u_{г.мин}$. Для уменьшения абразивного износа твердых стенок необходимо устанавливать $u_{ср} = u_{г.мин}$.

Минимальную скорость взвешенного пневмотранспорта частиц материала $u_{г.мин}$ для сечения 3-3 инжектора установим на основе зависимости, предложенной в работе [7]:

$$u_{г.мин} = 1,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{4g \cdot d_3 \cdot u_{вит} \cdot W}{\beta \cdot (2\xi_1 + \beta \cdot \xi_2 \cdot W)}}, \quad (4)$$

где g — ускорение свободного падения; $u_{вит}$ — скорость витания частиц в газе; $W = m_{т} / (m_{г.р} + m_{г.о})$ — массовая концентрация потока смеси; ξ_1 — коэффициент сопротивления трения чистого газа о твердую стенку; β и ξ_2 — опытные коэффициенты, равные соответственно 0,3 и 0,0036.

Тогда на основе (3) и (4) получим следующую зависимость для определения диаметра струи d_3 в точке ее касания со стенкой инжектора:

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

Для обеспечения требуемого диаметра струи d_3 , необходимое расстояние сопла от начала камеры смешения L (см. рисунок 4) должно составлять:

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

где φ — половинный угол раскрытия струи рабочего газа (факела) в приемной камере инжектора.

В случае если $d_3 < d_2$, то второе слагаемое в правой части зависимости (6) при расчете расстояния L учитываться не должно.

Половинный угол раскрытия струи φ можно рассчитать, используя зависимости для определения максимального радиуса r_{ϕ} и длины l_{ϕ} газового факела приведенные в работе [9]:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{r_{\phi} - 0,5d_1}{l_{\phi} - r_{\phi}} \right), \quad (7)$$

где $l_\phi = \frac{u_1 \cdot 0,5d_1}{1,6u_{\text{вм}}c_n}$ — максимальная длина газовой зоны факела;

$r_\phi = \left(l_\phi \frac{c_n - a}{1 + c_n} + 0,5d_1 \frac{1}{1 + c_n} \right)$ — максимальный радиус факела; $c_n = 2a = 0,8$ — опытные коэффициенты.

Расчеты угла ϕ по зависимости (7) для струи истекающей в среду азрированного материала дают значение угла $\phi \cong 19^\circ$, что почти в 2 раза больше в сравнении со свободной струей газа, распространяющейся в среде той же плотности, для которой $\phi \cong 10^\circ$ [5].

Оптимальное значение диаметра приемной камеры D определяется условием нестесненного движения струи рабочего газа в приемной камере инжектора, которое согласно [10] может быть представлено в виде

$$D \geq 16d_1. \quad (8)$$

В противном случае в приемной камере возникает циркуляционное движение материала, которое нарушает стабильность выдачи материала и приводит к интенсивному абразивному износу стенок приемной камеры.

При использовании опытной конструкции питателя в опытно-промышленных исследованиях технологии сульфидирования и десульфурации чугуна порошковыми реагентами (серой и содой) в индукционной печи ИСТЧ-0,2, установленной в электросталеплавильном цехе ОАО «Константиновский завод «ВТОРМЕТ», оптимальные значения параметров L и D , определенные по зависимостям (5)-(8), составили $L=60$ мм и $D=30$ мм. При этом обеспечивалась стабильная и регулируемая выдача реагентов в расплав чугуна в диапазоне 1...2,5 кг/мин.

Таким образом, проведенные лабораторные и опытно-промышленные исследования показали, что полученные теоретические зависимости позволяют установить оптимальные значения параметров приемной камеры инжектора азриационного питателя, при которых обеспечивается стабильная и регулируемая выдача материала.

Список литературы

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^е изд., переработанное — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 352 с.
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. Кузнецов Ю.М. Камерный питатель для процессов инжекционной металлургии (эксперимент, расчет, конструкция). Производственно-техническое издание. — М.: Интернет Инжиниринг, 2000. — 57 с.
8. Шахова Н.А. Истечение турбулентных струй в псевдооживленный слой // Инженерно-физический журнал, 1968. — Т. 14. — № 1. — С. 61–69.
9. 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.
10. Струйные течения в рабочих камерах и смесительных устройствах. — Академия наук Эстонской ССР, 1973. — 204 с.