

УДК 674:817-41:621,547

Г.Н.Вахтеров, В.И.Бирюков,  
Э.М.Бегляров  
(Всесоюзный научно-исследовательский институт древесины)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В СВОБОДНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Создание новых высокопроизводительных формирующих устройств, позволяющих в воздушной среде получать ковер с облагороженными поверхностями, требует изучения аэродинамических характеристик древесных частиц в газовых (воздушных) потоках.

При формировании ковра процессы ориентации, распределения, осаждения на сетки древесных частиц, а также фильтрации формирующего агента протекают взаимосвязанно. Более того, они протекают одновременно в сложных аэродинамических и физических условиях, и изменение одного из них неизбежно влияет на параметры другого. В связи с этим объяснение механизма явлений, протекающих во время формирования ковра, и их математическая трактовка представляют значительные трудности.

В отечественной и зарубежной литературе исследованию турбулентных газовых струй, механики двухфазных струй газа с примесью твердых частиц или капель посвящено довольно большое число работ.

В работах [1,2] Г.Н.Абрамовича представлена теория расчета турбулентных струй и дается описание процесса распространения поля и профили скоростей осесимметричных газовых потоков.

Исследования кинематики и динамики твердых частиц в газовой среде приведены в работах [3,4], в которых рассматриваются вопросы теплообмена, массообмена между газом и частицами, а также расчет относительной и абсолютной скоростей движения твердых частиц в гетерогенных системах.

Вопросы распределения капель или твердых частиц в процессе их движения в газовых потоках были исследованы рядом авторов [5,6,7], которых интересовали данные об удельных полях потоков для форсунок, равномерность и тонина распыла жидкостей, распределение топлива (угольная пыль, бензин, мазут) по сечению распыленной струи. Известны также работы [8,9] по исследованию аэродинамических характеристик измельченных лигноцеллюлозных материалов.

Большинство исследований, касавшихся аэродинамики свободных газовых струй, были узко специальными и рассматривали, например, вопросы поведения в потоке цементной или угольной пыли, кварцевого песка и т.д. Изучению динамики распределения в свободных воздушных потоках измельченных лигноцеллюлозных материалов не уделялось большого внимания, и сведения по этим вопросам в литературе недостаточны.

В связи с разработкой нового способа и устройства для воздушно-вакуумного формирования, симметричного по структуре облагороженного ковра, нами были проведены экспериментальные исследования по определению степени отклонения единичных частиц от оси свободного воздушного потока в зависимости от размеров и плотности частиц, а также скорости воздуха. Эти вопросы являются определяющими при нахождении оптимальных конструктивных и технологических параметров формирующей установки.

Для выяснения закономерностей поведения твердых частиц в движущейся газовой среде наибольший интерес представляет изучение, в первую очередь, вертикального прямого тока сверху вниз, где направления силы тяжести и силы сопротивления среды, воздействующих на твердую частицу совпадают, что же касается других направлений потока, то для них принципиальные выводы о характере движения частиц в газовой среде остаются в силе.

Для определения влияния указанных факторов нами была разработана и изготовлена установка по изучению аэродинамических характеристик единичных частиц в свободном воздушном потоке. (рис.1).

Частицы в разгонную трубку 4, крепящуюся штангами 3 к стойке 9, вводились в воронку 6 или посредством шнека 12. Подхватенные воздушным потоком, выходящим из патрубка 5, частицы направлялись в сторону мишени 1 и оседали на сетку, с предварительно нанесенным на нее слоем вавелина. Значение давления

# Электронный архив УГЛТУ

сжатого воздуха определялось манометром 7 и регулировалось редуктором 8. Расстояние от среза насадка 2 до мишени 1 отсчитывалось по шкале 10.

Древесные частицы, в частности, дефибраторное волокно имеют небольшие размеры и цилиндрическую форму (длина 1,4-3,14 мм, диаметр 0,044-0,047 мм). В условиях проведения эксперимента точная фиксация местоположения таких мелких частиц на мишени была затруднительна. Поэтому для выявления общих закономерностей распределения единичных частиц в воздушном потоке были выбраны шарообразные пенопластовые частицы различных диаметров - 2,5; 4; 8; 10; 12 мм, плотностью 40 кг/м<sup>3</sup>.

Скорость потока воздуха, подаваемого в разгонную трубку в течение эксперимента, была постоянна и равнялась 18,2 м/с.

Давление сжатого воздуха после редуктора составляло 0,25 МПа. Давление по оси воздушного потока измерялось при помощи трубки Пито. Повторность опыта составляла 10.

Цель настоящих исследований заключалась в изучении динамики твердых частиц в свободном воздушном потоке и ограничивалась определением степени отклонения частиц от оси потока в зависимости от диаметра частиц, их плотности, а также пути пробега частиц в потоке.

Результаты измерения давления и скорости воздуха по оси потока приведены в табл.1.

Таблица 1

Давление и скорость воздуха на оси потока

Расстояние от среза насадка, м	Динамическое давление, Па	Статическое давление, Па	Скорость потока, м/с
0,01	560	-	18,2
0,10	510	-	17,8
0,20	480	-	15,7
0,30	360	80,0	12,5
0,40	220	58,0	11,3
0,50	160	36,0	9,8
0,60	140	30,0	6,95
0,70	130	21,0	6,7
0,80	120	11,0	6,26

Продолжение таблицы 1

Расстояние от среза насадка, м	Динамическое давление, Па	Статическое давление, Па	Скорость потока, м/с
0,90	100	9,0	5,42
1,00	90	8,7	4,8
1,10	84	7,0	4,4
1,20	78	4,4	3,62
1,30	71	3,6	3,1
1,40	63	2,6	2,54
1,50	56	1,8	2,1

Из табл.1 видно, что скорость и давление воздуха по оси потока уменьшаются с увеличением расстояния от среза насадка. Следовательно, продольная составляющая сил, действующих на частицы, по мере удаления от среза насадка тоже уменьшается.

О величине поперечной (радиальной) составляющей сил, обусловленных перепадом давления между центральными и периферийными областями потока, можно косвенно судить по степени отклонения частиц от оси потока (рис.2).

Действием этих радиальных сил и объясняется наблюдаемое различное отклонение частиц от оси воздушного потока в зависимости от размеров и количества движения.

Для определения степени отклонения в зависимости от плотности частиц были отобраны пенопластовые частицы диаметром 8 мм. Вес частицы изменялся помещением внутрь ее, без изменения объема и формы 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 1 частей свинцовой дробинки.

Затем частицы вводились в воздушный поток и производились замеры отклонения частиц от центра мишени. Расстояние мишени от среза насадка было постоянно и составляло 2000 мм. Давление воздуха в редукторе составляло 0,25 МПа, т.е. скорость воздуха на выходе из насадка была постоянной и равнялась 18м/с.

Результаты опытов представлены на рис. 3.

Характер кривой отклонения в зависимости от плотности частиц имеет вид, подобный кривым отклонения в зависимости от диаметра частиц. Это значит, что в воздушном потоке происходит пространственное распределение частиц не только в зависимости от

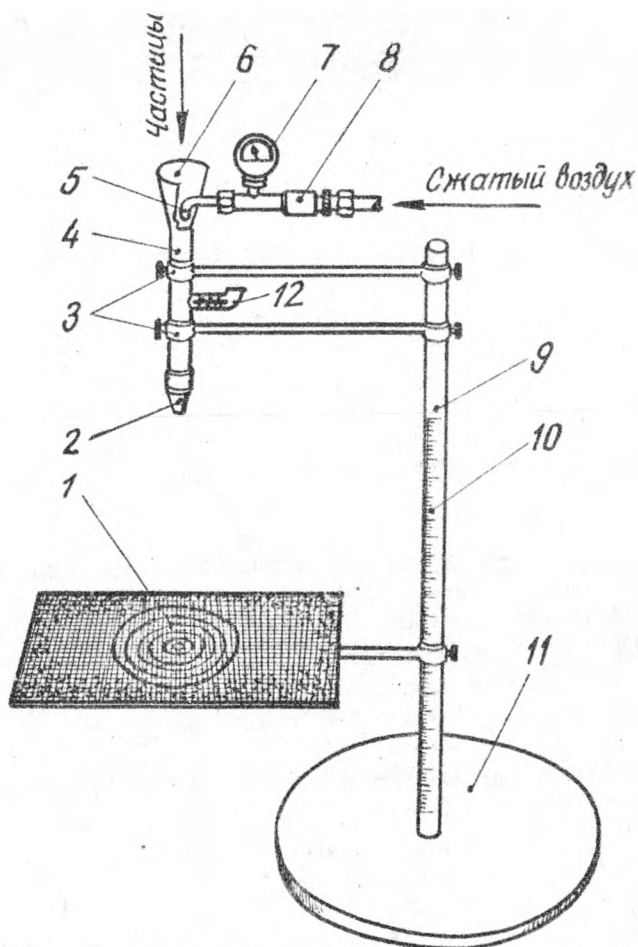


Рис.1. Установка для изучения кинематики единичных частиц в свободном воздушном потоке:  
1- мишень; 2- сменный насадок; 3- штанга;  
4- расгонная трубка; 5- патрубок; 6- воронка;  
7- манометр; 8- редуктор; 9- стойка; 10- шкала;  
11- основание; 12- шнек.

размеров, но и их плотности.

С целью определения влияния скорости воздушного потока на степень отклонения частицы был выбран диапазон изменения скоростей от 2,5 до 18 м/с. Скорость воздушного потока изменялась по оси потока и изменялась посредством регулирования давления воздуха в редукторе.

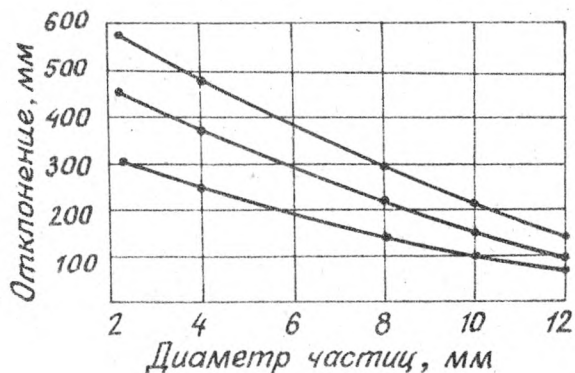


Рис. 2. Зависимость степени отклонения по оси воздушного потока от размера частиц:

1- расстояние мишени от среза насадка 1000 мм.

2 - 1500 мм, 3 - 2000 мм.

Методика определения влияния скоростей частиц на степень от оси воздушного потока сводилась к изменению пути разгона частицы в разгонной трубке. Известно, что в начальный период частицы, введенные в воздушный поток, определенный отрезок времени движутся ускоренно. Учитывая это, путем введения частиц в различные точки по длине разгонной трубки мы получали различные скорости частиц на срезе насадка. При этом

скорость воздушного потока; диаметр, плотность частиц были постоянными. В результате проведенных экспериментов была замечена тенденция к уменьшению степени отклонения частиц, имеющих большую начальную скорость на срезе насадка. Это объясняется тем, что с увеличением скорости частицы растут ее количество движения, и частицы, обладающие большим количеством движения, обладают более прямолинейной траекторией на данном участке пути.

Характер движения свободных воздушных потоков существенно отличается от движения несвободных, например, движения в трубах. В работе [2] отмечается, что при установившемся движении поперечные профили скорости частиц и газа в трубе остаются одинаковыми в различных сечениях. Этого не наблюдается в свободном потоке, где как профили скорости воздуха, так и профили скорости частиц непрерывно деформируются при переходе от одного поперечного сечения струи к другому.

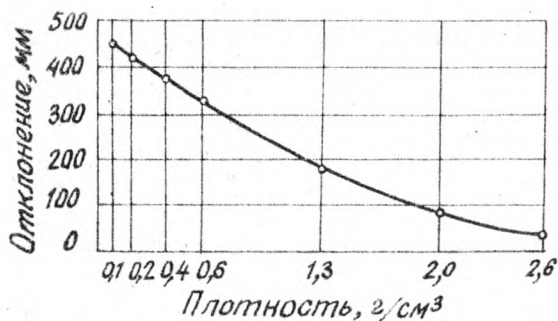


Рис. 3. Степень отклонения частиц по оси потока в зависимости от их плотности.

Расстояние мишени от среза насадка 1500 мм.

До начала устойчивого движения характерным является то, что отношение скорости частиц к скорости воздушного потока изменяется и, наконец, принимает такое числовое значение, которое при дальнейшем увеличении остается неизменным. Величина этого отношения зависит, главным образом, от форм, размеров и объемного веса транспортируемых частиц. При установившемся движении частицы перемещаются параллельно оси трубопровода, причем масса частиц заметного влияния на движение не оказывает

Осевая составляющая скорости газа в свободном потоке может значительно отличаться от осевой составляющей скорости частиц в зависимости от геометрии частиц, скорости их витания, рассматриваемой зоны движения и т.д. Радиальная составляющая скорости газа в осесимметричном потоке весьма мала в сравнении с осевой составляющей и принципиально не влияет на общую аэродинамическую картину, поэтому в теоретических расчетах [1], а также при рассмотрении прикладных задач [10] ею, как правило, пренебрегают. Однако, радиальная составляющая скорости частиц; в ряде случаев незначительно отличаясь от радиальной составляющей скорости газа, обуславливает физическое явление (фракционирование частиц по сечению потока), представляющее большой практический интерес.

Уравнение динамики частиц в свободном воздушном потоке можно записать в следующем виде

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = \vec{F}_{\text{аэрод}} + \vec{F}_{\text{откл}} + \vec{P}, \quad (1)$$

где  $m$  — масса частиц;

$S$  — путь, пройденный частицей;

$t$  — время;

$F_{\text{аэрод}}$  — аэродинамическая сила;

$P$  — вес частицы;

$F_{\text{откл}}$  — отклоняющая сила.

Известно [10], что  $F_{\text{аэрод}} = \frac{1}{2} C_D f \rho_r (V_r - V_t) |V_r - V_t|$ ,

где  $C_D = \frac{a + b \cdot Re}{Re}$  — коэффициент сопротивления;

$a, b$  — константы, зависящие от  $Re$ ;

$Re$  — число Рейнольдса;

$f$  — миделево сечение частицы;

$\rho_r$  — плотность газа;

$V_r, V_t$  — соответственно скорости газа и частицы;

$F_{\text{откл}}$  — сила, искривляющая траекторию частицы и обусловленная или перепадом давления в свободных газовых потоках, или искусственным отсосом в зоне формирования ковра.



# Электронный архив УГЛТУ

Спроектируем уравнение (1) на оси координат

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{\text{аэрод}}(x) + F_{\text{откл}}(x) \quad , \quad (2)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = F_{\text{аэрод}}(y) + F_{\text{откл}}(y) - mg \quad . \quad (3)$$

При этом  $F_{\text{откл}}(y) = P S$  ,

где  $P$  - перепад давления;  
 $S$  - площадь сечения частицы.

$$F_{\text{аэрод}}(y) = \frac{1}{2} C_x f P_r (V_r(y) - V_z(y)) / |V_r(y) - V_z(y)| \quad .$$

Естественно допустить, что  $V_r(y) \approx V_z(y)$  , тогда  $F_{\text{аэрод}}(y) \approx 0$  .

Элементарные расчеты позволяют записать

$$F_{\text{откл}}(y) \gg mg \quad , \quad \text{тогда} \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = P S \quad .$$

В случае сферических частиц

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_c \frac{d^2y}{dt^2} &= \rho_f r^2 \quad , \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{3\rho_f}{4r \rho_c} \quad , \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho_c$  - плотность материала частицы;  
 $r$  - радиус частицы.

Интегрируя уравнение (4), получим

$$y = \frac{3P}{8.r \rho_c} (\Delta t)^2 \quad , \quad (5)$$

т.е. траекторией движения в этом простейшем случае является ветвь параболы.

Согласно формуле (5), траектории движения частиц различных размеров можно изобразить семейством кривых (рис. 4).

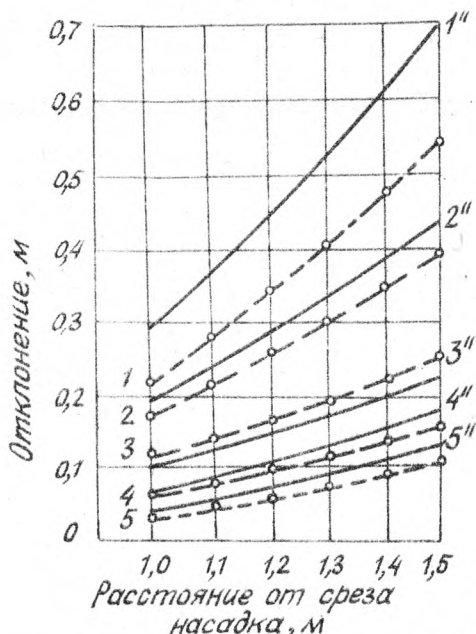


Рис. 4. Траектория движения частиц в свободном воздушном потоке:

1, 2, 3, 4, 5 — траектории (экспериментальные) движения частиц диаметром соответственно: 2, 5; 4; 8; 10; 12 мм. 1", 2", 3", 4", 5" — траектории (расчетные) движения частиц диаметром соответственно: 2, 5; 4; 8; 10; 12 мм.

При определении расчетных значений отклонений принято: статическое давление по оси струи — 18–80 Па, плотность частиц  $40 \text{ кг/м}^3$ , скорость частиц условно принималась равной скорости потока в интервале — 18,2–2,1 м/с.

Выполненная работа позволила оценить влияние размеров частиц, их плотности и относительной скорости на степень отклонения частиц от оси воздушного потока, что легло в основу раз-

# Электронный архив УГЛТУ

работки нового метода формования ковра и конструкции новой формирующей установки для получения облагороженного ковра с дифференцированным распределением фракций по его толщине.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М., "Физматгиз", 1960.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М., Гостехиздат, 1951.
3. Мелентьев П.В. Новая теория свободной струи. Сталинград, изд. Стал.мех.ин-та, 1952. (Тр.Стал.мех.ин-та, т. 1).
4. Вулис Л.А. О турбулентных газовых струях. "Иzv. AN KaaCCP", 1954, № 6.
5. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Панаев И.Н. Распыливание жидкостей форсунками. М., Госэнергоиздат, 1962.
6. Бородин В.А., Дитякин Ю.Ф., Клачко Л.С. Распыливание жидкостей. М., "Машиностроение", 1962.
7. Раммлер Э.К. К вопросу о закономерностях распределения по размерам измельченных материалов. - "Исследование и прогресс", 1956, № 1.
8. Бакаева Е.М., Коротов С.С. О скорости витания и удельной поверхности древесных волокон. "Иzv. вузов. Лесной журнал", 1966, № 4.
9. Бакаева Е.М. Аэродинамика волокнистого слоя в зависимости от свойств волокна. "Иzv. вузов. Лесной журнал", 1968, № 1.
10. Скворцов Г.Н. О движении частиц в свободной струе. - "Инженерно-физический журнал", 1964, № 5.