

В. В. Витушкин, Г. К. Каретников,  
В. М. Овчинников, В. Н. Прохоров,  
И. А. Сутырин

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗГОНА ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА В ПНЕВМОСТРУЙНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯХ

*Приведены метод и устройство для измерения скоростей твердых частиц в двухфазном потоке газа и результаты экспериментально-го определения этих скоростей для напорно-эжекторного устройства струйных измельчителей с центральным подводом измельчаемого материала. Анализ полученных данных позволил сформулировать практические рекомендации по оптимизации длины разгонной трубы устройств такого типа.*

Принципиальное отличие пневмоструйных измельчителей твердых материалов от традиционных механических мельниц и их преимущество по сравнению с последними заключается в использовании кинетической энергии разгона частиц материала газовым потоком для их разрушения в результате взаимодействия между собой или с преградой (мишенью). При этом процесс измельчения протекает тем интенсивнее, чем выше скорость, приобретенная частицами материала в напорно-эжекторных устройствах (НЭУ) струйной мельницы [1]. Для оценки эффективности тех или иных конструктивных вариантов НЭУ необходимо их сопоставление по скоростям разгона материала. Применение расчетных методов в данном случае весьма затруднено из-за сложности газодинамических процессов при смешении струй газа с измельчаемым материалом и последующего движения двухфазного потока в разгонных трубах (смесительных камерах). В то же время, известные экспериментальные оптические методы измерения скоростей частиц в двухфазных потоках требуют использования сложной и дорогостоящей аппаратуры и весьма трудоемки, так как для надежной статистической обработки таких измерений необходимо большое число замеров [2–4].

В настоящей работе предложен сравнительно простой способ определения скоростей частиц измельчаемого материала в выходном сечении разгонной трубы НЭУ, основанный на измерении количества движения газовой фазы потока. В этом методе количество движения твердой фазы двухфазного потока определяется как разность количеств движения однофазного потока и газовой фазы двухфазного потока при одинаковых суммарных расходах газа в НЭУ в одних и тех же условиях течения эжектирующего и поступления эжектируемого газов. При

этом полагается, что потерями, связанными с трением газа о частицы и взаимодействием частиц между собой, можно пренебречь. В результате при известном (измеряемом) расходе измельчаемого материала по измеренному его количеству движения определяется средняя скорость твердых частиц. По существу данный способ измерения представляет собой видоизмененный метод импульсов, используемый в экспериментальной аэродинамике для определения лобового сопротивления тел в дозвуковом потоке газа [5]. Для проведения исследования скоростей разгона частиц измельчаемого материала в НЭУ различного типа был разработан испытательный стенд, схема которого приведена на рис. 1.

Стенд содержит ресивер 1 сжатого газа, соединенный магистралью 2 с компрессорной установкой и трубопроводом 3 с напорно-эжекторным устройством 4, имеющим в данном случае кольцевое сопло подачи эжектирующего газа и центральное сопло подвода измельчаемого материала, конструкция которого описана в работе [6]. Измельчаемый материал поступает в НЭУ из воронки 5 через входной патрубок 6 и регулятор 7 расхода. Воронка снабжена клапаном 8 выпуска сыпучего материала 9 и жиклером-дозатором 10 подачи последнего во входной патрубок. После смешения измельчаемого материала с воз-

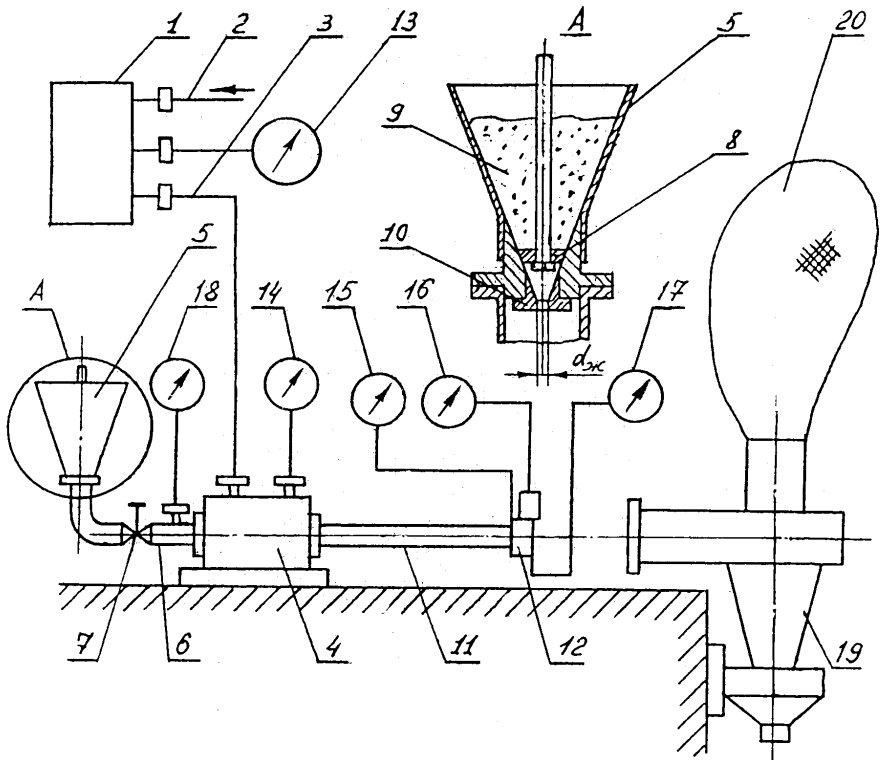


Рис. 1. Схема испытательного стенда

духом двухфазный поток поступает в разгонную трубу 11, на конце которой установлено измерительное устройство 12. Экспериментальные исследования проводились при трех значениях относительной длины разгонной трубы:  $\bar{L}_{\text{тр}} = L_{\text{тр}}/D_{\text{тр}} = 10,0; 20,2; 36,0$  (здесь  $L_{\text{тр}}$  — длина трубы,  $D_{\text{тр}} = 21,5 \times 10^{-3}$  м — ее внутренний диаметр). Стенд снабжен следующими измерительными приборами: манометрами 13, 14, 15, 16 и 17 измерения, соответственно, давлений в ресивере, форкамере рабочего сопла НЭУ, статического давления и полных давлений в измерительном устройстве 12, а также вакууметром 18 для измерения разрежения в патрубке 6. Истекающие из разгонной трубы частицы твердого материала улавливают с помощью циклона 19, на выходном патрубке которого закреплен матерчатый фильтр 20. Ресивер 1 позволяет поддерживать постоянный уровень давления питания рабочего сопла НЭУ и тем самым обеспечивать устойчивые режимы испытаний.

Конструкция устройства для измерения полного давления потока в выходном сечении разгонной трубы приведена на рис. 2. Устройство содержит корпус 1, на котором закреплены кронштейн 2 измерительной трубки 3 и основание 4 направляющего цилиндра 5. В цилиндре подвижно установлен поршень 6, фиксация которого в верхнем его по-

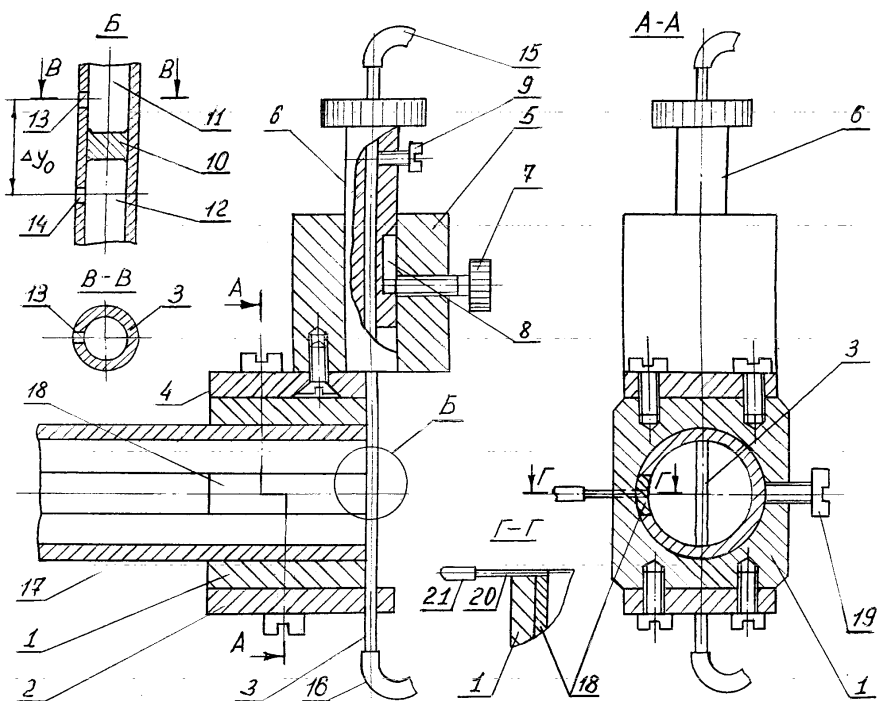


Рис. 2. Измерительное устройство

ложении обеспечивается упорным винтом 7, установленном в пазу 8 поршня: а в нижнем положении — основанием 4. В свою очередь, трубка 3 жестко закреплена в поршне посредством винта 9, а ее внутренняя полость разделена перегородкой 10 на две изолированные части 11 и 12 с дренажными отверстиями 13 и 14, соединенные гибкими трубками 15 и 16 с соответствующими манометрами (см. рис. 1, поз. 16 и 17). Положение корпуса 1 относительно разгонной трубы 17 фиксируется с помощью вставки 18, жестко скрепленной с корпусом 1, и винта 19. Для измерения статического давления потока в выходном сечении разгонной трубы в корпусе 1 и вставке 18 заподлицо с внутренней поверхностью последней закреплена (припаяна) дренажная трубка 20, соединенная с помощью гибкой трубки 21 с манометром (см. рис. 1, поз. 15).

При проведении экспериментальных исследований истечения потока из разгонной трубы измеряли давление  $p_0$  и температуру  $T_0$  торможения в форкамере сопла эжектирующего газа, разрежение  $p_{вх}$  во входном патрубке НЭУ, статическое давление  $p_{ст}$  в выходном сечении разгонной трубы, а также давление торможения  $p_{0i}$  в отдельных точках указанного сечения, используя описанное ранее измерительное устройство. При этом следует отметить, что точность измерения давления торможения потока с помощью измерительной трубки, установленной поперек потока разгонной трубки, как достаточно высокая оценивалась ранее в работе [7], где для измерения характеристик закрученных струй использовалось измерительное устройство, аналогичное данному.

Учитывая кратковременность отдельного эксперимента при двухфазном потоке, что связано с ограниченным количеством сыпучего материала, размещаемого в воронке 5 (см. рис. 1), измерения  $p_{0i}$  проводились последовательно в двух предельных положениях поршня 6 (см. рис. 2). При этом одновременно регистрировались значения  $p_{0i}$  в каждом из двух дренажных отверстий измерительной трубки 3. При выбранном расстоянии между осями дренажных отверстий  $\Delta \bar{y}_0 = \Delta y_0 / R_{тр} = 0,586$  в каждом эксперименте обеспечивалось измерение  $p_{0i}$  в четырех точках поперечного сечения разгонной трубы с координатами  $\bar{y}_i = y_i / R_{тр} = 0; 0,293; 0,586; \text{ и } 0,789$ , отсчитываемыми от оси симметрии трубы. Следует также отметить, что в экспериментах с двухфазным потоком вследствие интенсивного разрушения частицами твердого материала измерительной трубки, ее требовалось заменять после каждого такого эксперимента. По результатам измерений  $p_0, T_0, p_{0i}, p_{ст}$  для газовой фазы потока в соответствующих точках выходного сечения разгонной трубы рассчитывались скорости  $V_i$  либо по уравнению изоэнтропического течения при  $p_{ст}/p_{0i} \leq 0,528$ , либо по формуле Рэлея при  $p_{ст}/p_{0i} \geq 0,528$ ; значения температуры  $T_i$  и плот-

ности  $\rho_i$ ; скорость  $V_i$ ; удельный массовый расход  $(\rho V)_i$  и удельный импульс  $(\rho V^2)_i$ . Методика этих вычислений приведена в работе [6]. По найденным таким образом параметрам потока в указанных точках поперечного сечения разгонной трубы выстраивались осредненные профили этих параметров и затем путем численного интегрирования полученных профилей определялись полный массовый расход газа в НЭУ:

$$\dot{m} = \int_{(F_{\text{тр}})} (\rho V) dF = \int_{(F_{\text{тр}})} (\rho V) y d\varphi dy = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{R_{\text{тр}}} (\rho V) y dy;$$

средние значения скорости газа:

$$V_{\text{ср}} = \int_{(F_{\text{тр}})} V dF / F_{\text{тр}} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{R_{\text{тр}}} V y dy / F_{\text{тр}};$$

осредненные величины удельного количества движения потока в единицу времени (потока количества движения газа):

$$(\rho V^2)_{\text{ср}} = \int_{(F_{\text{тр}})} (\rho V^2) dF / F = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{R_{\text{тр}}} (\rho V^2) y dy / F_{\text{тр}},$$

где  $F_{\text{тр}}$  — площадь поперечного сечения разгонной трубы,  $\varphi$  и  $y$  — угловая координата и текущее значение радиуса точек этого сечения.

При закрытом регуляторе 7 (см. рис. 1) эти измерения позволяют определить расход эжектирующего газа  $\dot{m}_0$ . Оценка точности данного способа определения газодинамических параметров НЭУ дана в работе [6] на примере измерения  $\dot{m}_0$  через тарированные по стандартному расходомеру звуковые сопла (совпадения определяемых  $\dot{m}_0$  с точностью  $\approx 2\%$ ).

Для определения характеристик двухфазного потока и скоростей твердых частиц сыпучего материала измерения проводились в два этапа. На первом этапе после установления режима истечения газа из рабочего сопла открывался клапан 8 (см. рис. 1) загрузочной воронки и регистрировалось время ее опорожнения (время истечения фиксированной массы твердого материала), а также измерялись: разрежение  $p_{\text{вх}}$  в патрубке 6, статическое давление  $p_{\text{ст}}$  в выходном сечении разгонной трубы 11, и с помощью измерительного устройства 12 полное давление  $p_{0i}$  в четырех указанных точках выходного сечения трубы.

В качестве сыпучего материала в настоящей работе использовался кварцевый песок с размерами частиц от 200 до 315 мкм. Заданный

постоянный расход материала  $\dot{m}_T$  обеспечивался сменными жиклерами 10 с различными диаметрами  $d_{ж}$  проходного сечения, а также путем регулирования разрежения во входном патрубке НЭУ посредством регулятора 7.

Затем, на втором этапе измерений, при том же режиме работы НЭУ, но при отсутствии твердого материала и открытом клапане 8 с помощью регулятора 7 в патрубке 6 устанавливалось то же разрежение, что и на первом этапе измерений. Этим обеспечивался подсос в НЭУ эжектируемого газа с тем же массовым расходом  $\dot{m}_2$ , что и на первом этапе измерений вместе с твердым материалом. После этого проводились измерения тех же характеристик потока, в том числе  $p_{0i}$  в выходном сечении разгонной трубы. При этом расход эжектируемого (вторичного) потока определялся как разность суммарного расхода воздуха через разгонную трубу на первом этапе измерений и расхода только эжектирующего газа  $\dot{m}_0$  при закрытом регуляторе 7 и том же давлении торможения в форкамере рабочего сопла НЭУ.

По результатам двух указанных этапов измерений с использованием приведенной методики определяли средние значения потока количества движения однофазного  $(\rho V^2)_{cp}^I$  и газовой фазы двухфазного  $(\rho V^2)_{cp}^{II}$  потоков, по разности которых вычисляли осредненную скорость  $V_T$  частиц твердого материала

$$V_T = [(\rho V^2)_{cp}^I - (\rho V^2)_{cp}^{II}] F_{тр} / \dot{m}_T.$$

При таком способе определения  $V_T$  принимаются следующие допущения: потери давления (и, соответственно, количества движения эжектирующего газа) на смешение со вторичным потоком, на трение газа о стенки разгонной трубы и потери давления на выходе из нее в двухфазном потоке такие же, как и в однофазном потоке, т.е. в отсутствии измельчаемого материала, что представляется вполне допустимым, учитывая, что разность между скоростями однофазного и двухфазного потоков не превышает 20 %. Кроме того, не учитываются потери на смешение газового потока с твердым материалом, на трение газа о частицы материала, на трение последних о стенки разгонной трубы, на взаимодействие частиц между собой и их частичное разрушение ввиду незначительности этих факторов и трудности их учета.

В результате проведения испытаний в исследованном диапазоне определяющих параметров были получены распределения газодинамических характеристик потока в выходном сечении разгонной трубы. В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены профили скоростей  $V$  и потоков количества движения  $(\rho V^2)$ , полученные при одном и том же режиме работы сопла эжектирующего газа — при  $p_0 = 5 \cdot 10^5$  Па и одинаковом расходе твердого материала, т.е. при

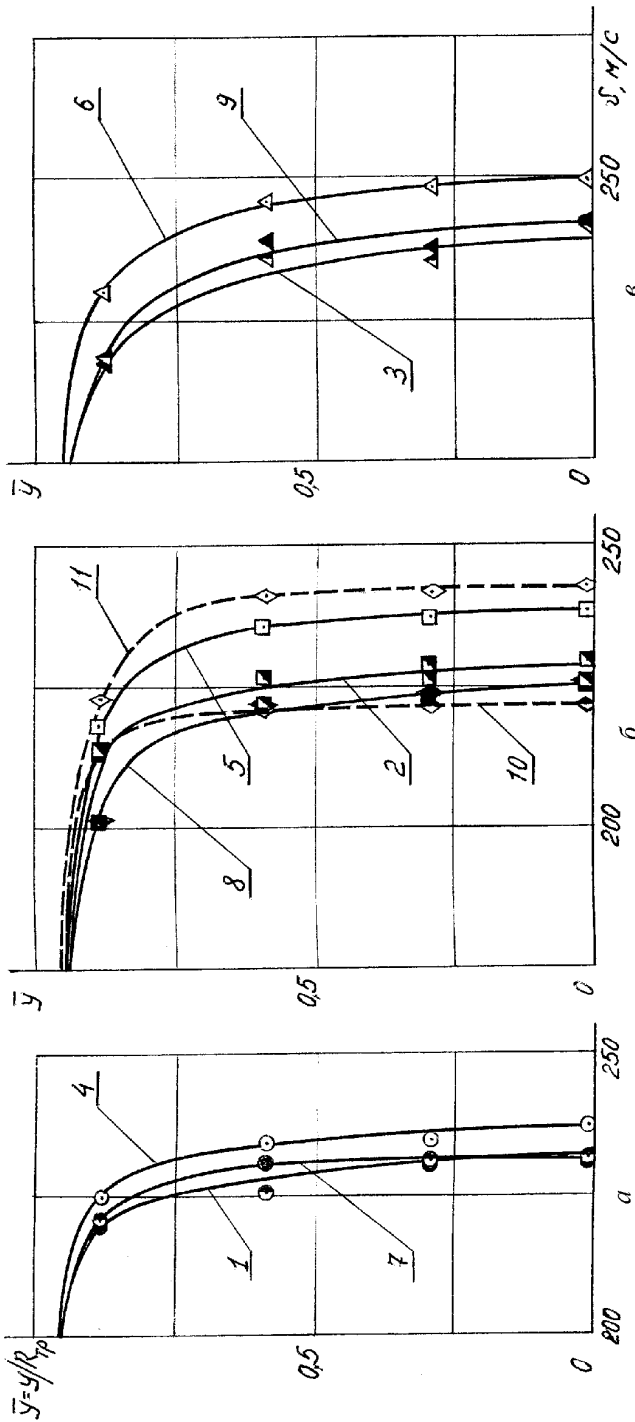


Рис. 3. Распределение скоростей потока в выходном сечении разгонной трубы

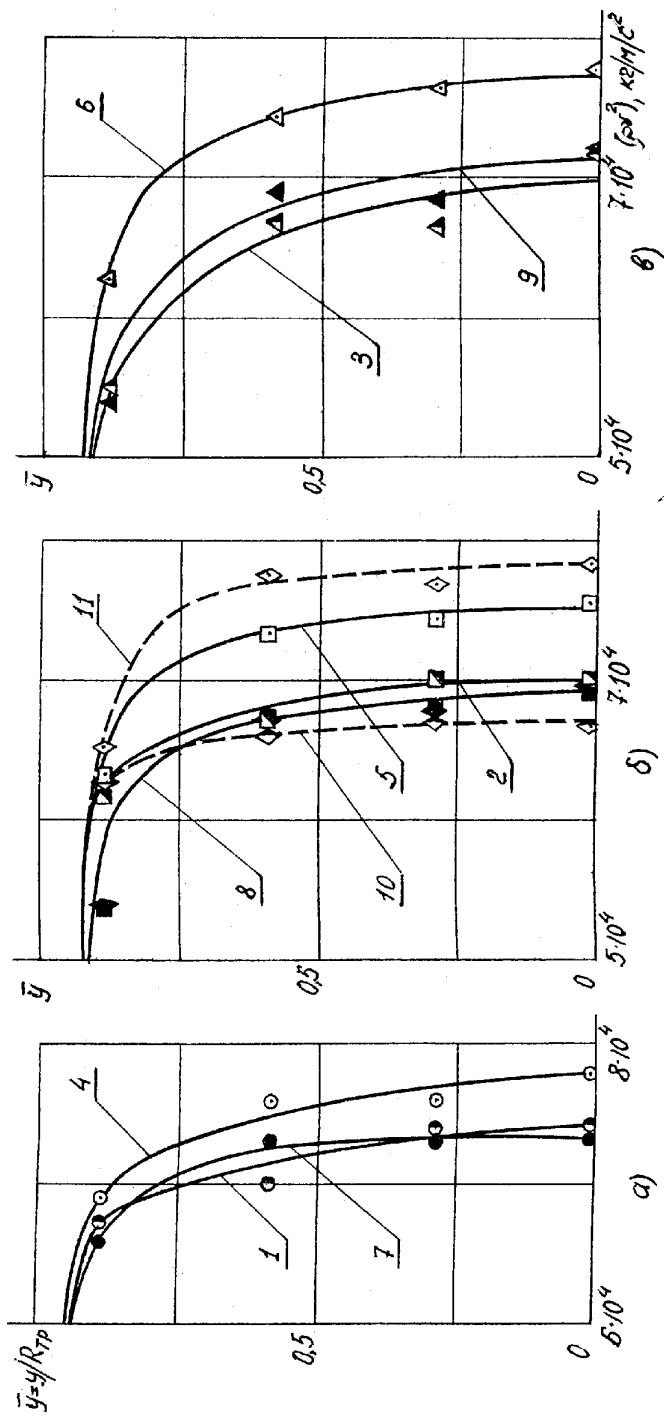


Рис. 4. Распределение потоков количества движения в выходном сечении трубы



одном и том же диаметре жиклера —  $d_{\text{ж}} = 3 \cdot 10^{-3}$  м для трех значений длины разгонной трубы ( $\bar{L}_{\text{тр}} = 10$  — рис. 3, а и 4, а;  $\bar{L}_{\text{тр}} = 20,2$  — рис. 3, б и 4, б;  $\bar{L}_{\text{тр}} = 36$  — рис. 3, в и 4, в).

Приведенные распределения  $V$  и  $(\rho V^2)$  по поперечному сечению трубы соответствуют следующим режимам работы НЭУ: двухфазный поток —  $\dot{m}_{\text{т}} = 0,04$  кг/с (1 —  $\dot{m}_2 = 0,0027$  кг/с; 2 —  $\dot{m}_2 = 0,0038$  кг/с; 3 —  $\dot{m}_2 = 0,0055$  кг/с); однофазный поток —  $\dot{m}_{\text{т}} = 0$  (4 —  $\dot{m}_2 = 0,0027$  кг/с; 5 —  $\dot{m}_2 = 0,0038$  кг/с; 6 —  $\dot{m}_2 = 0,0055$  кг/с); однофазный поток —  $\dot{m}_{\text{т}} = 0$  и  $\dot{m}_2 = 0$  (зависимости 7, 8 и 9).

Кроме того, в целях выявления влияния повышения концентрации твердого материала в двухфазном потоке на эффективность разгона этого материала на рис. 3, б и 4, б штриховыми линиями показаны профили  $V^I$  и  $(\rho V^2)^I$ , полученные при  $\bar{L}_{\text{тр}} = 20,2$  и  $d_{\text{ж}} = 6,5$  мм, т.е. при увеличенных расходах  $\dot{m}_{\text{т}}$  и  $\dot{m}_2$ , но при неизменном расходе  $\dot{m}_0$  эжектирующего газа (зависимости 10 —  $\dot{m}_{\text{т}} = 0,06$  кг/с,  $\dot{m}_2 = 0,0062$  кг/с и 11 —  $\dot{m}_{\text{т}} = 0$ ,  $\dot{m}_2 = 0,0062$  кг/с).

Анализ приведенных распределений  $V$  и  $(\rho V^2)$  показывает, что при всех исследованных режимах работы НЭУ газодинамические характеристики потока в поперечном направлении выходного сечения разгонной трубы плавно изменяются со снижением значений  $V$  и  $(\rho V^2)$  вблизи стенки трубы вследствие трения. В случае двухфазного потока вместе с твердым материалом через выходной участок НЭУ поступает некоторое количество вторичного эжектируемого газа. Причем с увеличением длины разгонной трубы для обеспечения одного и того же расхода твердого материала необходимо с помощью регулятора 7 (см. рис. 1) повышать расход  $\dot{m}_2$  эжектируемого воздуха. Добавление же к рабочему потоку вторичного газа приводит к возрастанию скорости и потока импульса (см. рис. 3 и 4, зависимости 4, 5, 6) по сравнению с режимом течения при  $\dot{m}_2 = 0$  (зависимости 7, 8, 9), что связано с отмеченными ранее, с одной стороны, повышением суммарного расхода газа в разгонной трубе [6], а с другой — снижением в этом случае потерь давления рабочего газа на начальном участке трубы, где реализуется весьма сложная структура течения.

При подаче в НЭУ твердого материала происходит существенное уменьшение величин  $V$  и  $(\rho V^2)$  вследствие передачи части кинетической энергии газового потока частицам материала (см. рис. 3, 4, зависимости 1, 2, 3). При этом с увеличением расхода  $\dot{m}_{\text{т}}$  твердого материала, при прочих равных условиях, по необходимости возрастает и расход  $\dot{m}_2$  эжектируемого газа, и, как следствие, наблюдается увеличение значений  $V$  и  $(\rho V^2)$  газовой фазы потока (см. рис. 3 и 4, поз. 11), что должно способствовать повышению эффективности разгона частиц измельчаемого материала.

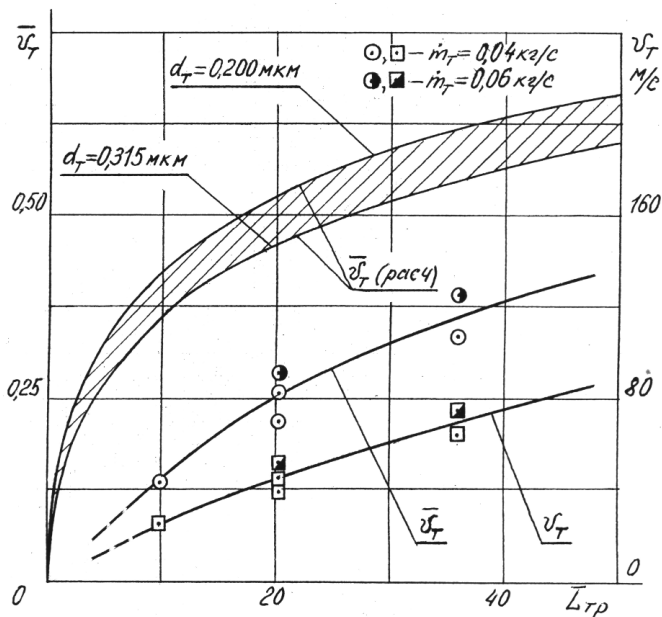


Рис. 5. Средние скорости частиц материала в выходном сечении разгонной трубы

Результаты измерения скоростей твердых частиц, полученные по приведенному методу, показаны на рис. 5 в виде зависимостей абсолютной скорости  $V_T$  частиц и этой же скорости, отнесенной к скорости потока, —  $\bar{V}_T = V_T/V_{cp}$  (здесь  $V_{cp}$  — средняя скорость газового потока на выходе из разгонной трубы), от длины  $\bar{L}_{тр}$  трубы. Следует отметить, что относительная погрешность данного метода измерения  $V_T$  в условиях проведенных испытаний составляет, по оценкам авторов, в среднем  $\sim 15\%$ .

Увеличение длины разгонной трубы способствует возрастанию скорости разгона частиц твердого материала, однако интенсивность роста  $V_T$  падает с повышением  $\bar{L}_{тр}$ , что связано с постепенным выравниванием скоростей газа и твердых частиц между собой и, как следствие, уменьшением сил, действующих на частицы со стороны газового потока. Следует отметить, что увеличение расхода твердого материала и, соответственно, вторичного потока способствует некоторому повышению скорости разгона вследствие отмеченного возрастания  $V$  и  $(\rho V^2)$  суммарного потока газа в разгонной трубе.

Измерения скоростей частиц твердого материала с использованием предложенного метода испытаний, кроме их практической ценности при проектировании струйных мельниц, могут быть использованы также при разработке и оценке тех или иных методов расчета двухфазных течений и определении скоростей разгона материала в НЭУ струйных

измельчителей. В частности, в настоящей работе приведены результаты расчетов разгона частиц твердого материала в идеальных условиях, т.е. в отсутствии каких-либо потерь давления, при постоянной скорости потока по всей длине участка разгона, нулевой начальной скорости частиц и в предположении, что частицы материала имеют сферическую форму и одинаковый диаметр (200–315 мкм). Движущая (разгоняющая) сила, действующая на частицу, в данном случае является по своей сущности аэродинамической силой сопротивления и может быть определена по формуле из работы [5]:

$$F = c_x q S_M,$$

где  $c_x$  — безразмерный коэффициент силы лобового сопротивления;  $q$  — скоростной напор потока;  $S_M = \pi d_T^2/4$  — площадь миделевого сечения частицы,  $d_T$  — ее диаметр.

Для сферической частицы при числах Рейнольдса  $Re = 1000 \dots 3000$  (что соответствует диапазону скоростей газа и размерам частиц твердого материала в данных испытаниях) значение  $c_x$  может быть принято равным 0,5. Скоростной напор определяется соотношением

$$q = 0,5\rho V_{\text{отн}}^2 = 0,5\rho(V - V_T)^2,$$

где  $\rho$  — плотность газа;  $V_{\text{отн}}$  — относительная скорость обтекания потоком частицы твердого материала;  $V$  и  $V_T$  — скорости потока и частицы соответственно.

Дифференциальное уравнение движения отдельной частицы материала в векторной форме имеет вид

$$m_T d\vec{V}/dt = \vec{F},$$

где  $m_T = \rho_T \pi d_T^3/6$  — масса частицы;  $\rho_T$  — ее плотность.

Представляя скорость частицы как функцию пройденного пути вдоль продольной оси разгонной трубы, т.е.  $V = f(x)$ , и учитывая приведенные соотношения для  $F$  и  $q$ , получим дифференциальное уравнение движения частицы в проекции на ось  $x$  (ось трубы):

$$V_T(dV_T/dx) = 0,75c_x(\rho/\rho_T)(V - V_T)^2/d_T,$$

или в безразмерной форме после разделения переменных:

$$\bar{V}_T d\bar{V}_T / (1 - \bar{V}_T)^2 = [0,75c_x(\rho/\rho_T)d_T d_{\text{тр}}] d\bar{x},$$

где  $\bar{V}_T = V_T/V$  — относительная скорость частицы,  $\bar{x} = x/d_{\text{тр}}$  — относительная продольная координата.

Вводя для константы в квадратных скобках обозначение  $A$ , имеем

$$\bar{V}_T d\bar{V}_T / (1 - \bar{V}_T)^2 = A d\bar{x}.$$

Решение полученного дифференциального уравнения имеет следующий вид:

$$\ln(1 - \bar{V}_T) + 1/(1 - \bar{V}_T) = Ax + C,$$

где постоянная  $C$  определяется из начальных условий: при  $\bar{x}(0) = 0$ ,  $\bar{V}_T(0) = 0$  и, следовательно,  $C = 1$ .

Окончательно для зависимости  $\bar{V}_T(x)$  получим

$$\bar{x} = [\ln(1 - \bar{V}_T) + 1/(1 - \bar{V}_T) - 1] / A$$

и для скорости частицы материала на выходе из разгонной трубы:

$$\bar{L}_{\text{тр}} = [\ln(1 - \bar{V}_T) + 1/(1 - \bar{V}_T) - 1] / A.$$

Результаты расчетов скоростей частиц на выходе из разгонной трубы по полученному уравнению приведены на рис. 5 в виде заштрихованной области. Сопоставление этих данных с экспериментальными показывает, что действительные скорости частиц вследствие потерь кинетической энергии потока существенно ниже теоретически возможных в идеальных условиях течения двухфазного потока в разгонной трубе. Как было указано, потери складываются из потерь на трение газа о стенки трубы, потерь во входном участке и на выходе из трубы, потерь на смешение рабочего потока с твердым материалом и эжектируемым вместе с ним воздухом, а также потерь на взаимодействие частиц материала между собой и со стенкой трубы и их частичное разрушение. При этом наиболее существенными в данном случае являются потери энергии во входном участке, связанные с истечением недорасширенных струй эжектирующего газа и формированием в этой области сложной системы скачков уплотнения [6]. Эти особенности течения делают задачу точного расчета течения в разгонной трубе трудноразрешимой.

Следует отметить, что смешение твердого материала, поступающего по центральному соплу, с рабочим потоком кольцевого сопла, охватывающего центральное сопло, происходит не мгновенно, а на некотором начальном участке разгонной трубы. По этой причине в случае малой длины разгонной трубы снижение действительных скоростей частиц по отношению к теоретически возможным наиболее существенно. С увеличением  $\bar{L}_{\text{тр}}$  снижается относительная длина участка смешения и, несмотря на некоторое повышение в этом случае потерь на трение, уменьшается разность между действительными и расчетными значениями скоростей разгона частиц твердого материала.

Полученные в настоящей работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

Приведенный метод определения скоростей частиц твердого материала дает возможность при разработке струйных мельниц сравнительно просто экспериментальным путем проверить и оценить те или иные конструктивные варианты НЭУ по эффективности разгона твердых материалов.

Экспериментальные данные показывают, что увеличение относительной длины разгонной трубы НЭУ, наряду с повышением скорости разгона измельчаемого материала, приводит к возрастанию коэффициента эжекции вторичного потока, т. е. к увеличению затрат энергии на разгон этого потока и, как следствие, к снижению эффективности НЭУ. Оптимальные значения относительной длины разгонной трубы для НЭУ струйных измельчителей с центральным подводом твердого материала находятся в окрестности  $\bar{L}_{тр} = 20$ . Однако поскольку необходимые скорости разгона определяются, в основном, физическими свойствами измельчаемого материала, то, с учетом этого, длины разгонных труб могут существенно превышать указанные оптимальные значения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А к у н о в В. И. Струйные мельницы. - М.: Машиностроение, 1967. – 263 с.
2. Ф у к с - Р а б и н о в и ч Л. И., Е п и ф а н о в М. В. Оптико-электронные приборы. – Л.: Машиностроение, 1979. – 362 с.
3. Д ю р а н а Е., Т р е й т и д К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 336 с.
4. И с с л е д о в а н и е блочного струйного течения лазерными оптическими методами / С.М. Антонов, В.М. Литвинов, В.В. Проколов и др. // Труды ЦАГИ. – 1985. – Вып. 2276.
5. П р и к л а д н а я аэродинамика / Под ред. Краснова Н.Ф.. – М.: Высшая школа, 1974. – 730 с.
6. В и т у ш к и н В. В., К а р е т н и к о в Г. К., О в ч и н н и к о в В. М., П р о х о р о в В. Н., С у т ы р и н И. А. Исследование газодинамических характеристик напорно-эжекторных устройств струйных измельчителей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2001. – № 2. – С. 31–40.
7. В и т у ш к и н В. В., К а р е т н и к о в Г. К., О в ч и н н и к о в В. М., П р о х о р о в В. Н., С у т ы р и н И. А. Газодинамические характеристики пневмоструйных измельчителей с центральным подводом материала // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2003. – № 3. – С. 28–41.

Статья поступила в редакцию 6.01.2004

Георгий Константинович Каретников родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 30 научных работ в области аэрогазодинамики струйных и отрывных течений.

G.K. Karetnikov (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 publications in the field of aerogas dynamics of detached and jet flow.

Вячеслав Николаевич Прохоров родился в 1938 г., окончил в 1962 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Баллистика и аэродинамика” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 40 научных работ в области аэрогазодинамики струйных и отрывных течений, проектирования органов управления полетом.

V.N. Prokhorov (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1962. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Ballistics and Aerodynamics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 publications in the field of aerogas dynamics of jet and separate streams, design of flight controls.

Вячеслав Валентинович Витушкин родился в 1942 г., окончил в 1968 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теоретическая механика” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 50 научных работ в области прикладной аэрогазодинамики.

V.V. Vitushkin (b. 1942) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph.D.(Eng.), assoc. professor of “Theoretical Mechanics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 publications in the field of applied aerogas dynamics.

Игорь Александрович Сутырин родился в 1944 г., окончил в 1968 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Баллистика и аэродинамика” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 45 научных работ в области прикладной аэрогазодинамики и баллистики.

I.A. Sutyurin (b. 1944) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Ballistics and Aerodynamics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 45 publications in the field of applied aerogas dynamics and ballistics.

Владимир Михайлович Овчинников родился в 1936 г., окончил в 1963 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Научный сотрудник НИИСМ МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 50 научных работ в области экспериментальной аэрогазодинамики.

V.M. Ovchinnikov (b. 1936) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1963. Researcher of Research Institute for Special Mechanical Engineering of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of experimental aerogas dynamics.