

<https://doi.org/10.3176/phys.math.tech.1965.4.11>

М. ЛААТС

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СТРУИ

При повышении единичных мощностей пылеугольных, в частности сланцевых, котлов возникает ряд проблем (повышенное шлакование поверхностей нагрева, необходимость повышения удельных тепловых напряжений топочного объема), для решения которых необходим расчет горелочных устройств и аэродинамики топочного объема.

Большинство горелочных устройств пылеугольных топков основано на принципе струйного перемешивания, кроме того, сам пылеугольный факел фактически представляет собой горящую струю, в объеме которой определенным образом распределены частицы топлива. Закономерности же развития струй, содержащих ощутимые количества твердых частичек, изучены недостаточно. Имеются попытки исследовать динамику пылеугольного факела [2], однако одновременное влияние многих противоположных по знаку факторов (горение, ограничение, наличие частиц) затрудняет раскрытие физической картины процессов, происходящих в факеле. Представляется целесообразным такой путь изучения, при котором влияние отдельных факторов выделяется в чистом виде и изучаются закономерности элементарных процессов. Настоящая работа и представляет собой попытку изучения влияния частиц на динамику пылевоздушной струи.

Распространение пылевоздушной струи характеризуется в основном скоростью нарастания толщины пограничного слоя, а также распределением параметров по поперечным сечениям струи. Аналитическое решение Г. Абрамовича [1] основывается на ряде допущений физического порядка, часть которых к настоящему времени пришла в противоречие с опытными данными различных исследователей. Так, например, принимается, что безразмерное поле концентрации по безразмерной ширине струи подобно полю температур

$$\bar{c} = \frac{c}{c_m} = \frac{T}{T_m} = \bar{T} = 1 - \xi^{1,5}, \quad (1)$$

что сводится к допущению о независимости процесса турбулентного переноса от рода переносимой субстанции. Что касается распределения газовой примеси в поперечных сечениях струи, то полное подобие полей безразмерной температуры и концентрации доказано. Исследования же распределения концентрации реальных пылевых частиц по поперечным сечениям пылевоздушной струи [3, 4] показали, что уже для сравнительно тонкой пыли ($R_{70} = 0\%$) поле концентрации значительно расходится с (1). То же самое показывают и опытные данные И. Кубынина [5]. Не соответствует действительности и допущение о равенстве скоростей частиц и несущей среды по всему объему струи. А. Чернов [6] показал, что обнаруженная для запыленного потока [7] относительная скорость частиц особенно существенна для свободных потоков (струй) уже для сравнительно мелких частиц порядка 60 м. Он же попытался с учетом обнаруженного

им экспериментального факта о постоянстве соотношения скоростей частиц к скорости несущей среды по поперечному сечению струи [8] дополнить решение [1] учетом относительного движения фаз [9], приняв это соотношение постоянным по длине струи. Неясно также, насколько хорошо уравнение распространения струи с переменной плотностью

$$\frac{d\bar{r}}{dx} = c \frac{1 + \bar{q}}{2} = c \frac{1 + 0,5\kappa_m}{1 + \kappa_m} \quad (2)$$

описывает расширение пылевоздушной струи. Все это потребовало сопоставления решения [1] с экспериментальными данными.

В наших опытах исследовалась динамика пылевоздушной струи, вытекающей из длинной трубы различного размера с различными начальными скоростями и концентрациями. В качестве пыли использовалась пылевидная зола эстонских сланцев с остатком на сите $R_{80} = 20\%$.

Основными агрегатами опытной установки (рис. 1) являются: центробежный вентилятор 1 производительностью до $180 \text{ нм}^3/\text{час}$ и плавно регулируемый шнековый питатель 9 производительностью $G_{\text{п}} = 15 \div 55 \text{ кг}$ пыли в час. Остальные узлы предназначены для измерения и поддержания параметров потока до выхода из трубы. Скорости по объему струи измеряются закрепленной в координатнике специальной трубкой, «отработавший» загрязненный воздух поступает в коллектор на всосе другого вентилятора и после очистки выбрасывается в атмосферу.

Измерительный комплекс выделен на рис. 1 пунктиром. Методика измерения скорости излагается ниже.

При измерении скорости потока, содержащего ощутимые количества тяжелых частиц, торможение частиц в приемнике давления искажает показания обычных пневмометрических трубок. Специальная измерительная трубка 17 состоит из приемника давления и индикаторной трубки, соединенной с индикаторным прибором 23. При отсосе газов через трубку избыточное давление, регистрируемое прибором, равняется $\frac{\rho(u_1 - u_2)^2}{2}$ (статическое давление в свободной струе незначительно отличается от атмосферного). Здесь u_1 — скорость набегающего потока; u_2 — скорость отсоса; ρ — плотность воздуха.

Расход отсоса регулируется игольчатым краном так, чтобы индикаторный прибор показывал ноль. Измерив ротаметром 19 расход отсоса и зная размеры трубки, определяется скорость набегающего потока. В действительности, по-видимому за счет неравномерного втекания, скорость, полученная таким способом, несколько отличается от скорости набегающего потока, поэтому приходится пользоваться тарировочными кривыми.

Малая длина между торцевым и контрольным сечениями практически исключает влияние торможения частиц, а малая длина горизонтальной части — засорение трубки.

В основном развитие струи характеризуется затуханием осевой скорости. Теоретические соображения [1] указывают на определенное влияние твердой фазы на затухание осевой скорости пылевоздушной струи. Однако экспериментальных данных, которые подтвердили бы это, по существу нет. Единственные опытные данные И. Кубынина [5] не могут быть использованы, так как они обобщены в координатах $\frac{u_m}{u_0} = \mathbf{u} \left(\frac{x}{x_{0,5u_0}} \right)$, а зависимость $x_{0,5u_0} = \mathbf{v}(x_0)$ в работе не приводится. (Здесь u_m — скорость воздуха на оси струи; u_0 — начальная скорость; x — расстояние от устья

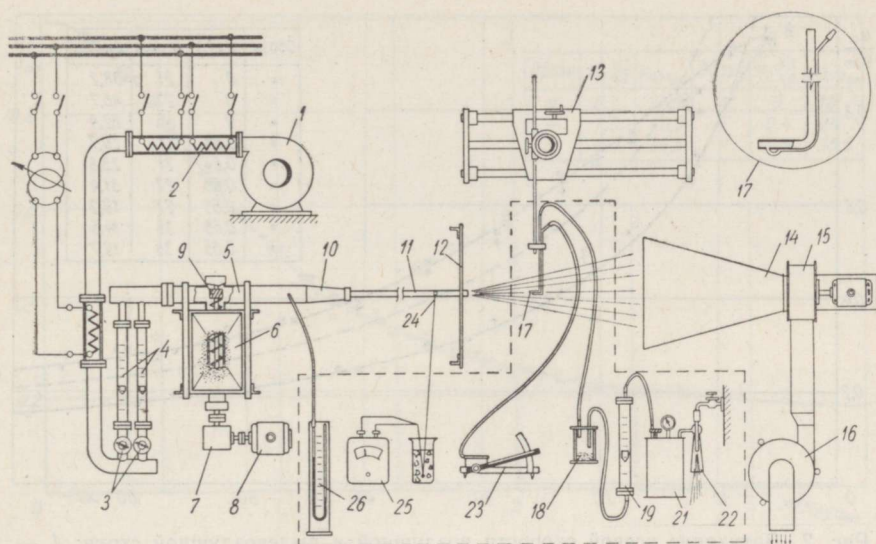


Рис. 1. Схема опытной установки и измерений: 1 — центробежный вентилятор; 2 — электронагреватели; 3 — регулировочные краны; 4 — ротаметры РС-7; 5 — смеситель; 6 — бункер пыли; 7 — редуктор; 8 — мотор постоянного тока; 9 — шнек с двенадцатизаходным червяком; 10 — патрон; 11 — разгонная труба-сопло; 12 — вертикальная рама; 13 — координатник; 14 — коллектор; 15 — вентилятор ЭВР-4; 16 — циклон; 17 — измерительная отсосная трубка; 18 — пылетстойник; 19 — ротаметр РС-3; 20 — игольчатый кран; 21 — уравнильный бачок; 22 — водяной эжектор; 23 — микроманометр ММН; 24 — термопара; 25 — потенциометр; 26 — U-образный манометр.

сопла; $x_{0,5u_0}$ — расстояние от устья сопла до точки, где скорость на оси струи составляет половину от начальной скорости.) Кроме того, в этой работе не приводится и характерная скорость твердой фазы на выходе из сопла.

Наши опыты проведены в условиях, когда характерная начальная скорость твердой фазы на выходе из сопла, определяемая как соотношение секундного количества движения твердой фазы к массовому расходу ее была близка к характерной начальной скорости воздуха, определяемой также:

$$u_{п0x} = \frac{I_{0п}}{m_{0п}} = \frac{\int_0^{F_0} \rho_B u_{0в} x_0 u_{0п} dF_0}{\int_0^{F_0} \rho_B x_0 u_{0в} dF_0} \approx u_{в0x} = \frac{I_{0в}}{m_{0в}} = \frac{\int_0^{F_0} \rho_B u_{0в}^2 dF_0}{\int_0^{F_0} \rho_B u_{0в} dF_0},$$

где ρ_B — плотность воздуха; x_0 — начальная весовая концентрация; $U_{п0x}$; $I_{0п}$; $m_{0п}$; $U_{0п}$ и $U_{в0x}$; $I_{0в}$; $m_{0в}$; $u_{0в}$ — характерная начальная скорость, начальное количество движения, массовый расход и скорость на выходе из сопла пыли и воздуха соответственно.

Практически это достигалось путем увеличения длины разгонного участка до 2,5 м; подтверждением полного разгона всей пыли считалось полное подобие кривой затухания осевой скорости при одинаковой начальной концентрации по всей длине струи, вплоть до значений начальной скорости $u_{0m} = 40$ м/сек (под начальной скоростью здесь и далее подразумевается максимальная скорость в устье сопла).

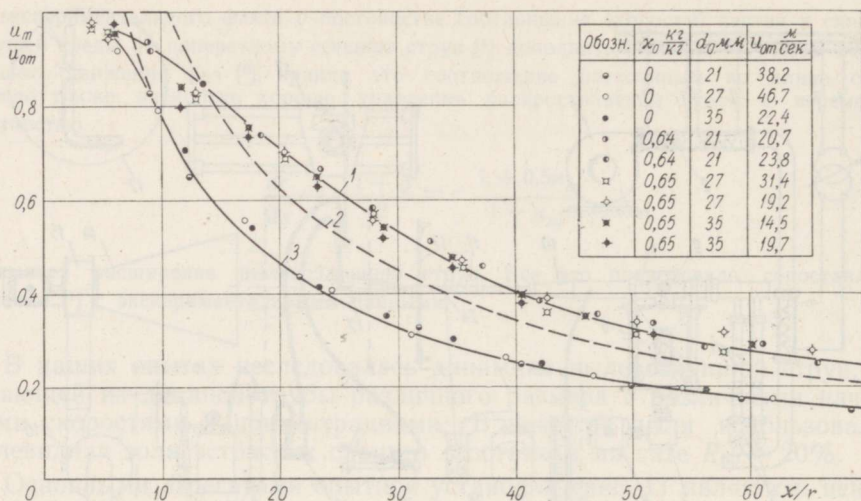


Рис. 2. Затухание осевой скорости воздушной и пылевоздушной струи: 1 — пылевоздушная струя с начальной концентрацией $\chi_0 = 0,65 \text{ кг/кг}$ (опыт); 2 — расчетная по [1] кривая для пылевоздушной струи; 3 — опытная кривая для воздушной струи.

Опытная кривая 1 (рис. 2) затухания осевой скорости пылевоздушной струи с данной начальной концентрацией ($\chi_0 = 0,65 \text{ кг/кг}$), вытекающей из длинной трубы различного размера с различными начальными скоростями, как и опытная кривая для воздушной струи 3, имеет универсальный характер — она не зависит от размера сопла и от начальной скорости. Однако в то время, как опытная кривая для воздушной струи хорошо совпадает с расчетной по формуле Г. Абрамовича [1]

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{2,73 \sqrt{n_{2u}}}{c(x-x_0)},$$

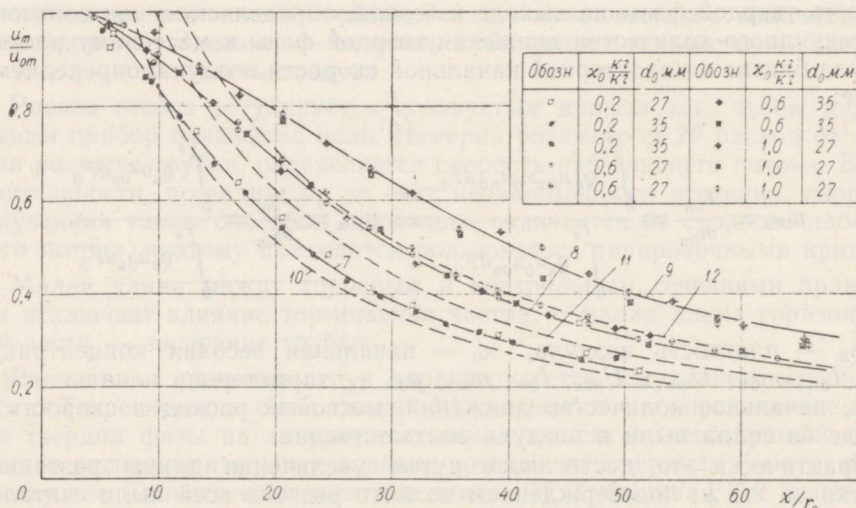


Рис. 3. Затухание осевой скорости пылевоздушной струи: 7, 8 и 9 — опытные кривые для пылевоздушной струи и 10, 11 и 12 — расчетные по [1] кривые для значений начальной концентрации $\chi_0 = 0,2; 0,6$ и $1,0 \text{ кг/кг}$ соответственно.

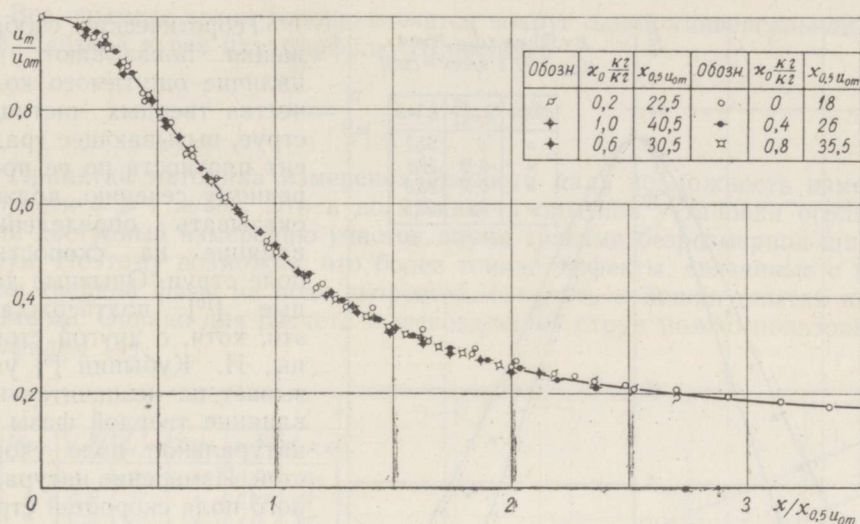


Рис. 4. Обобщенная кривая затухания осевой скорости пылевоздушной струи.

опытная кривая для пылевоздушной струи по всей длине расходится с расчетной 2 по формулам Г. Абрамовича для двухфазных струй.

Такие же опытные данные получены для значений начальной концентрации $x_0 = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ и $1,0 \text{ кг/кг}$. На рис. 3 для наглядности изображены опытные кривые лишь для значений начальной концентрации $x_0 = 0,2; 0,6$ и $1,0 \text{ кг/кг}$ (кривые 7, 8, и 9), а также соответствующие им расчетные кривые (10, 11 и 12). Рисунок показывает, что расхождение опытных данных с расчетными возрастает с увеличением начальной концентрации. Вблизи устья сопла опытные кривые особенно резко расходятся с расчетными. Это явление не может быть объяснено несовершенством теории переходного участка, так как последний, в случае истечения с турбулентным профилем, мал. Поэтому расхождение, по-видимому, указывает на влияние относительного движения фаз, которое при выводе формул [1] не учитывалось.

Экспериментальные данные по затуханию осевой скорости пылевоздушной струи удачно обобщаются в координатах $\frac{u_m}{u_{0m}} = u_1 \left(\frac{x}{x_{0,5u_{0m}}} \right)$ (рис. 4).

Совместно с полученной из опытов зависимостью абсциссы точки с половинной скоростью как функции от начальной концентрации ($x_{0,5u_{0m}} = v_1(x_0)$) это дает возможность получить следующую расчетную формулу затухания осевой скорости пылевоздушной струи, вытекающей из длинной трубы:

$$\frac{u_m}{u_{0m}} = \exp \left[-0,69 \left(\frac{x}{18 + 22 x_0} \right)^{1,75} \right]. \quad (3)$$

Формула (3) получена для зоны, близкой к соплу ($\bar{x} = \frac{x}{x_{0,5u_{0m}}} \leq 1,0$), и для опытного диапазона изменения начальной концентрации $x_0 = 0 \div 1,0 \text{ кг/кг}$, что охватывает весь практически интересный диапазон изменения начальной концентрации и расстояния.

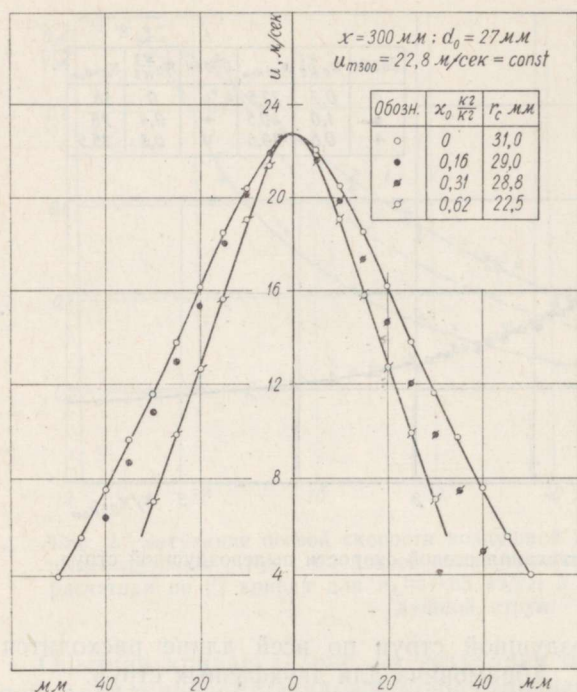


Рис. 5. Натуральное поле скоростей пылевоздушной струи.

(рис. 5). Рисунок наглядно показывает, что с увеличением начальной концентрации происходит сужение струи. Более интересные результаты получаются при изображении тех же полей в безразмерных координатах $\frac{u}{u_m} = s \left(\frac{r}{r_{0,5u_m}} \right)$, приведенных на рис. 6. (Здесь u — текущая скорость; u_m — скорость на оси рассматриваемого сечения; r — текущий радиус; $r_{0,5u_m}$ — радиус до точек с половинной скоростью.)

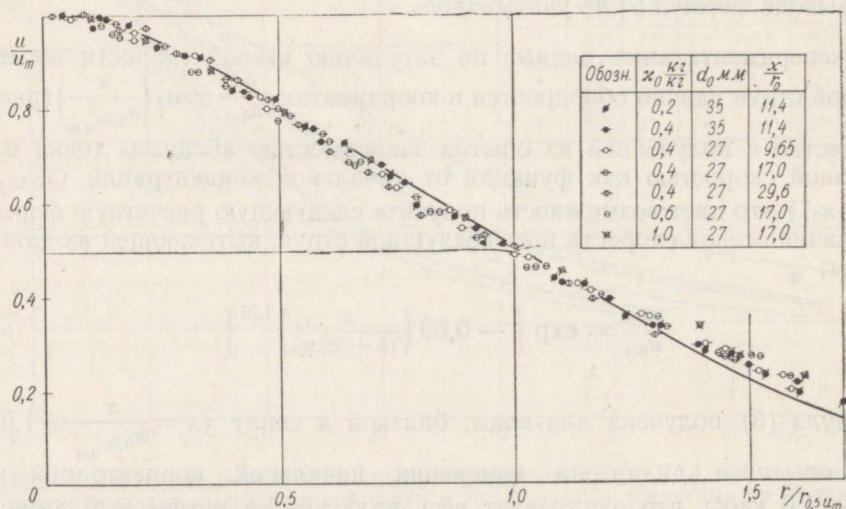


Рис. 6. Профиль скорости в поперечных сечениях пылевоздушной струи.

Теоретические соображения показывают, что наличие ощутимого количества твердых частиц в струе, вызывающее градиент плотности по ее поперечному сечению, должно оказывать определенное влияние на скоростное поле струи. Опытные данные [10] подтверждают это, хотя, с другой стороны, И. Кубынин [5] указывает на незначительное влияние твердой фазы на натуральное поле скоростей. Измерение натурального поля скоростей струи с разной начальной концентрацией ($\alpha_0 = 0; 0,16; 0,31$ и $0,62$), проведенное для наглядности при одинаковой скорости на оси выбранного поперечного сечения ($x = 300 \text{ м.м.}$, $x/r_0 = 22,2$), говорит о вполне ощутимом влиянии твердой фазы на это поле

Все опытные точки хорошо ложатся вокруг одной универсальной кривой, близкой к так наз. профилю Шлихтинга

$$\bar{u} = \frac{u}{u_m} = (1 - \xi^{1,5})^2. \quad (4)$$

Принятая методика измерения скорости дала возможность измерять скорости $u \geq 4$ м/сек. Это и возможности опытной установки ограничили доступный измерению участок двумя третями безразмерной ширины струи. Поэтому возможно, что более тонкие эффекты, связанные с влиянием твердой фазы на поле скоростей, остались в наших опытах нераскрытыми. Однако для расчета пылевоздушной струи можно пользоваться профилем (4).

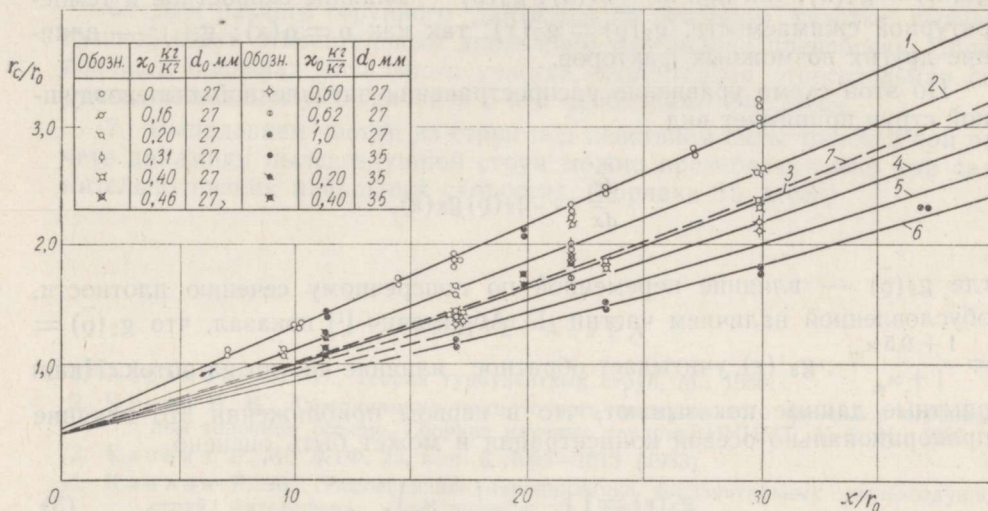


Рис. 7. Линии половинной скорости в пылевоздушной струе: 1, 2, 3, 4, 5, 6 — линии половинной скорости (опытные) для значений начальной концентрации $\chi_0 = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ и $1,0$ кг/кг; 7 — расчетная по [1] для $\chi_0 = 1,0$ кг/кг.

Большой интерес представляет установление влияния твердой фазы на расширение пылевоздушной струи. Непосредственное фотографическое определение видимой границы пылевоздушной струи в зависимости от начальной концентрации не увенчалось количественным успехом. Поэтому для характеристики расширения пылевоздушной струи по измерениям скоростей в поперечных сечениях струи были определены линии половинной скорости при различных значениях начальной концентрации ($\bar{r}_{0,5u_m} = t(\chi_0; x)$). При предположении универсальности профиля скоростей (4) по всей безразмерной ширине струи они однозначно характеризуют расширение пылевоздушной струи. Опытные данные с построенными по ним линиями половинной скорости (1, 2, 3, 4, 5, 6), а также рассчитанная по формулам [1] линия половинной скорости для начальной концентрации $\chi_0 = 1,0$ кг/кг (7) нанесены на рис. 7. Напомним, что формулы [1] получены с учетом уравнения распространения струи, заимствованного у струи с переменной плотностью (2). По рис. 7 можно видеть, что опытные данные говорят о более значительном влиянии твердой фазы на расширение струи. Совместный анализ кривых затухания осевой скорости и кривых, характеризующих расширение пылевоздушной струи, по-

казывает, что это явление может быть объяснено обратным влиянием частиц на структуру турбулентного потока, приводящим к «торможению» процесса поперечного переноса. По-видимому, это связано с «гашением» турбулентных пульсаций инерционными частицами.

Уравнение распространения струи может быть записано в следующем виде:

$$\frac{d\bar{r}}{d\bar{x}} = c g(m; \bar{q}; \dots i),$$

где c — скорость возрастания толщины изотермического струйного пограничного слоя; $g_1(m)$ — влияние спутного потока, в общем случае $g_1(m) = g_1(\bar{x})$, так как $m = m(\bar{x})$; $g_2(\bar{q})$ — влияние скоростной и температурной сжимаемости, $g_2(\bar{q}) = g_2(\bar{x})$, так как $\bar{q} = q(\bar{x})$; $g_i(i)$ — влияние других возможных факторов.

По этой схеме уравнение распространения затопленной пылевоздушной струи принимает вид

$$\frac{d\bar{r}}{d\bar{x}} = c g_2(\bar{q}) g_3(\varepsilon),$$

где $g_2(\bar{q})$ — влияние переменной по поперечному сечению плотности, обусловленной наличием частиц. Г. Абрамович [1] показал, что $g_2(\bar{q}) = \frac{1 + 0,5 \kappa_m}{1 + \kappa_m}$; $g_3(\varepsilon)$ учитывает обратное влияние частиц на поток. Наши опытные данные показывают, что в первом приближении это влияние пропорционально осевой концентрации и может быть оценено

$$g_3(\varepsilon) = \left(1 - \frac{f}{1 + \kappa_0} \kappa_m \right). \quad (5)$$

Таким образом, уравнение распространения пылевоздушной струи принимает вид

$$\frac{d\bar{r}}{d\bar{x}} = c \frac{1 + 0,5 \kappa_m}{1 + \kappa_m} \left(1 - \frac{f}{1 + \kappa_0} \kappa_m \right),$$

где f — опытная постоянная, которая, по-видимому, несколько зависит от дисперсного состава пыли.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Кривая безразмерной осевой скорости по безразмерной длине пылевоздушной струи $\left(\frac{u_m}{u_{0m}} = p \left(\frac{x}{r_0} \right) \right)$ имеет универсальный характер во всем опытном диапазоне изменения начальных скоростей ($u_{0m} \leq 40$ м/сек).
2. Кривая безразмерной скорости по безразмерному радиусу пылевоздушной струи $\left(\frac{u}{u_m} = s \left(\frac{r}{r_{0,5u_m}} \right) \right)$; на доступном измерению участке также имеет универсальный характер и для практических расчетов может быть описана профилем Шлихтинга (4).
3. Уравнение распространения струи переменной плотности не описывает расширение пылевоздушной струи. При наличии в струе ощути-

мого количества частиц сказывается обратное влияние реальных частиц на интенсивность процесса турбулентного переноса, тем самым и на расширение пылевоздушной струи.

4. Это влияние, по-видимому, пропорционально числу частиц в рассматриваемом объеме, а также зависит от их аэродинамических характеристик. Анализ опытных кривых дает основание оценить это влияние формулой (5).

5. Иной закон расширения пылевоздушной струи по сравнению с тем, который принимается в существующем методе расчета, приводит к более медленному затуханию осевой скорости по отношению к расчетной. Поэтому целесообразно дополнить этот расчет с учетом нового закона расширения.

6. Для расчета струйного движения на основном участке пылевоздушной струи относительным движением фаз можно пренебречь. Вблизи сопла, в пределах начального участка, характерная относительная скорость, по-видимому, большая и с ней необходимо считаться.

7. Выпадением частиц из струи под действием силы тяжести при расчете динамики пылевоздушной струи можно пренебречь даже при сравнительно низких начальных скоростях (порядка 15 м/сек).

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н., Теория турбулентных струй, М., 1960.
2. Чукин В. В., Аэродинамика прямоточного пылеугольного факела в ограниченном топочном объеме, Сборник научных трудов ВНИИМТ, № 5, М., 1960.
3. Каплан Р. М., ЖТФ, 23, вып. 6, 1006—1013 (1953).
4. Каплан Р. М., Исследование аэродинамики горизонтальных пылевоздушных струй, Автореферат канд. диссерт., Л., 1951.
5. Кубынин И. Е., Изв. ВТИ, № 1, 9—15 (1951).
6. Чернов А. П., Докл. АН СССР, 105, № 6, 1170—1173 (1955).
7. Худяков Г. Н. и Чуханов З. Ф., Докл. АН СССР, 28, № 4, 681—684 (1951).
8. Чернов А. П., Бухман С. В., Исследование двухфазных свободных струй, Сб. Исследование физических основ рабочего процесса топок и печей, Алма-Ата, 1957.
9. Чернов А. П., ЖТФ, 26, вып. 5, 1060—1063 (1956).
10. Brusdeylins G. и Tillmann W., Mitt. VGB, H. 81, 377—388 (1962).

Институт термофизики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
3/III 1965

M. LAATS

TOLMUSTATUD JOA LEVIMISE EKSPERIMENTAALNE UURIMINE

Artiklis esitatakse tolmustatud jugade levimise seaduspärasuste eksperimentaalse uurimise tulemused. Uuriti tolmustatud vaba ümara õhujoa levimist algkontsentratsiooni muutumise piirkonnas $x_0 = 0 \div 1$ kg/kg. Joad telgkiiruse kustumise kõver on nagu õhujoadelgi universaalse iseloomuga, s. t. ta ei sõltu algkiirusest ega düüsi läbimõõdust, kuid raskete osakeste sisalduse tõttu tuleb teha märgatavaid korrektsiivse telgkiiruse kustumise seaduspärasusse.

Katsed näitavad, et tolmustatud joa ristlõigetes on kiiruste profiilil, nagu õhujugadegi puhul, universaalne kuju kogu algkontsentratsiooni muutumise diapsoonis.

Tahkete osakeste mõju joa laienemisele on suurem kui olemasolevad teoreetilised skeemid ette näevad. See on seletatav reaalseste osakeste tagasimõjuga turbulentsse ülekandeprotsessi intensiivsusele. Katsetulemused võimaldavad anda selle mõju kvantitatiivse hinnangu. Joa aeglasem laienemine põhjustab telgkiiruse aeglasema kustumise.

M. LAATS

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEVELOPMENT OF A DUST-CONTAINING STREAM

In the paper the results of an experimental investigation of the development of a two-phase stream carrying a lot of small solid particles, are presented. The free round two-phase stream within the range of the initial concentration $\alpha_0 = 0 \div 1$ kg/kg is the object of investigation.

The curve of the extinction of the axial velocity of the jet may be generalized — it does not depend on the initial velocity and the diameter of the jet. However, the presence of solid particles affects the process of the decay of the axial velocity.

Experimental data prove that the profile of velocities in different cross-sections of the stream can be generalized in a system of dimensionless coordinates for the entire range of initial concentration as well as for the air streams.

The influence of the solid particles on the spread of the stream is more important than expected. It can be explained by the adverse effect of particles on the intensity of the turbulent transfer process. Experimental data allow to estimate this influence. The slower expansion of the stream leads to a slower extinction of the axial velocity.