

## ДЕФОРМАЦИЯ ПРОФИЛЯ СКОРОСТЕЙ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В УСЛОВИЯХ ПНЕВМОТРАНСПОРТА

М. Е. ДОГИН, В. П. ЛЕБЕДЕВ

(Представлена кафедрой промтеплоэнергетики)

Изучение механизма движения твердой взвеси в пневмотранспортном трубопроводе тесно связано с представлениями об эюре скоростей двухфазного потока. Недостаточная изученность распределения скоростей в поперечном сечении пневмотранспортного трубопровода вызывает значительные трудности и противоречия в теоретических исследованиях.

В основном определение профиля скоростей производилось в условиях гидротранспорта. Для пневматического транспорта опытные данные по эюре скоростей приведены только в работе Калинушкина М. [1], на основании его измерений при транспорте опилок в горизонтальном трубопроводе  $D = 270$  мм при скорости  $10 \div 17$  м/сек и весовой концентрации  $0,046 < \rho < 0,184$ .

В отличие от гидравлического транспорта, в условиях пневмотранспорта наблюдается существенная деформация профиля скоростей, вследствие наличия твердой взвеси в потоке, существенно отличающейся по удельному весу от удельного веса воздуха. Причем, степень деформации зависит от загруженности потока, от свойств транспортируемого материала, а также от характеристики трубопровода.

В данной работе приводится оценка влияния указанных параметров на характер распределения скоростей по вертикали поперечного сечения горизонтально расположенной трубы, в опытах по пневматическому транспорту пшеницы и кварцевого песка.

Экспериментальные исследования выполнены на стенде, подробное описание которого приведено в работе авторов [2].

Экспериментальная установка состояла из устройств для нагнетания и измерения расхода воздуха, приспособления для равномерной подачи сыпучего материала и определения его расхода, прямолинейного горизонтального участка трубопровода длиной 12,5 м и диаметром  $D = 124,8$  мм, устройства для улавливания транспортируемого материала.

В конце трубопровода на расстоянии более 10 м от загрузочного устройства было установлено приспособление для снятия профиля скоростей в поперечном сечении потока. Принятое расстояние значительно превышало длину разгонного участка и, следовательно, измерение скоростей производилось на участке с установившимся движением двухфазного потока.

Приспособление для снятия эпюры скоростей состояло из пневмометрической трубки и устройства для ее плавного перемещения по вертикальному диаметру трубопровода (рис. 1).

Пневмометрическую трубку можно было устанавливать на любом вертикальном расстоянии от оси трубы.

Положение трубки фиксировалось по измерительной шкале приспособления с точностью до 0,1 мм.

Ввиду того, что стандартная пневмометрическая трубка довольно быстро забивалась частицами перемещаемого материала, особенно кварцевым песком, для этой цели была изготовлена специальная пневмометрическая трубка, которая отличалась от стандартной значительно меньшим диаметром ( $d=1$  мм) лобового отверстия, воспринимающего динамический напор. За отверстием в насадке трубки расположено некоторое пространство для улавливания частичек материала, которые могут проскочить через отверстие. Эта часть насадки сделана разъемной для возможности очистки от накопившегося материала. Опыт эксплуатации трубки показал надежную ее работу. Забивания трубки не происходило, а очищать приходилось крайне редко.

Тарировка производилась по стандартной трубке Прандтля, в потоке чистого воздуха.

Измерение перепада давлений в пневмометрической трубке производилось микроманометром типа ММН завода „Теплоавтомат“. Кроме того, в месте снятия эпюры скоростей фиксировались статическое давление и температура воздуха.

Скорость потока в каждой измеряемой точке поперечного сечения трубы вычислялась по формуле

$$w = \sqrt{\frac{2k\Delta p}{\rho}},$$

где  $k$  — тарировочный коэффициент насадки,

$\Delta p$  — перепад давления по микроманометру,

$\rho$  — плотность воздуха в трубе.

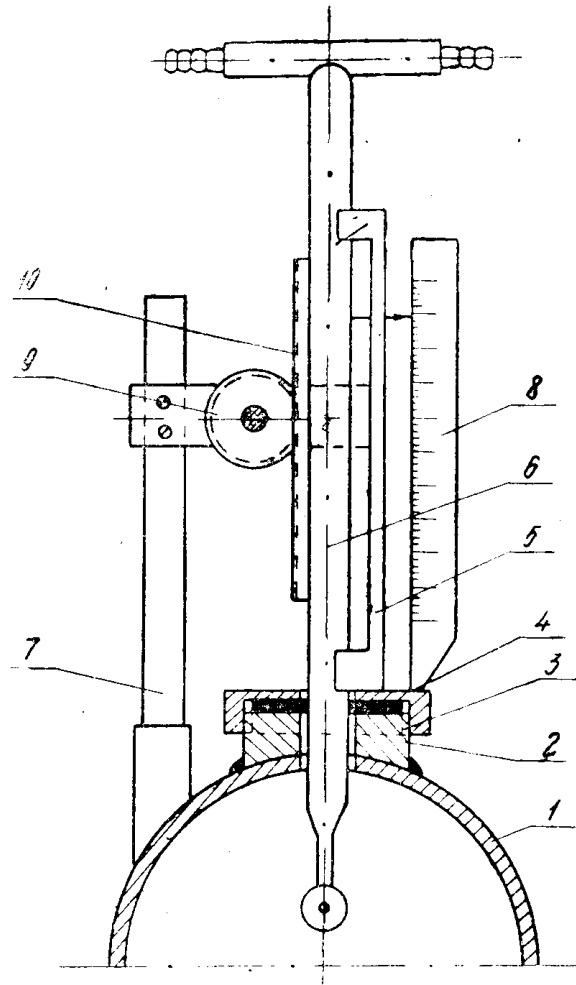


Рис. 1. Приспособление для снятия эпюры скоростей: 1—труба; 2—штуцер; 3—гайка; 4—резиновый уплотнитель; 5—направляющая стойка; 6—пневмометрическая трубка; 7—стойка; 8—шкала; 9—зубчатое колесо; 10—зубчатая рейка.

Для построения профиля скоростей измерения производились в семи точках вертикального диаметра трубы, включая и точку на оси трубы. Принятое количество измерений позволило полностью выявить характер эюры скоростей для различных режимов транспорта.

Каждому опыту по снятию эюры скоростей предшествовала предварительная настройка стенда на заданный режим транспорта. Настройка состояла в заполнении бункера питателя соответствующим материалом, в установлении определенной весовой концентрации транспортируемой смеси и в задании определенной скорости транспорта. Для контроля и поддержания заданных параметров в течение каждого опыта велись постоянные наблюдения по приборам стенда за расходом материала и воздуха, а также за другими характерными параметрами двухфазного потока.

Для оценки влияния весовой концентрации транспортируемой смеси  $\rho$  на деформацию профиля скоростей двухфазного потока на рис. 2

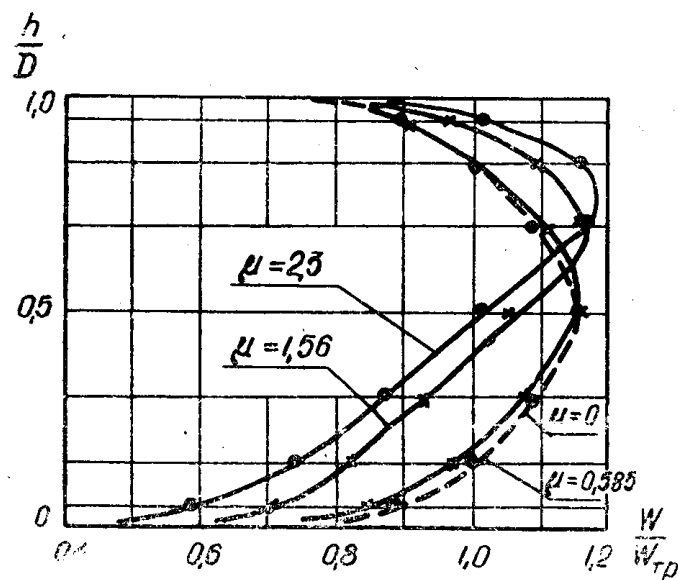


Рис. 2. Эюры скоростей в относительных координатах при транспорте пшеницы при постоянной средней скорости транспорта  $w_{cp} = 22,0 \text{ м/сек}$  и различной концентрации  $\rho$ .

представлены результаты снятия эюры при постоянной средней скорости воздуха  $w_{cp} = 22,0 \text{ м/сек}$  и различной загрузке потока пшеницей. На этом же графике нанесена эюра скоростей для чистого воздуха ( $\rho = 0$ ):

Из сравнения приведенных эюр следует, что при транспорте сыпучих материалов происходит деформация профиля скоростей тем существеннее, чем выше весовая концентрация  $\rho$ . Симметрия профиля, характерная для чистого воздуха, по мере увеличения загрузки потока твердой фазой, все в большей степени нарушается. Верхняя часть профиля вытягивается по направлению движения потока, а нижняя отстает и выпрямляется. Максимум скорости с оси трубы смещается в верхнюю половину ее и тем выше, чем больше концентрация материала в потоке.

Градиент скорости с увеличением весовой концентрации значительно уменьшается внизу профиля у нижней стенки трубы и возрастает вверх и в ядре потока.

Рассмотренная деформация эпюры скоростей объясняется большим торможением потока в нижней части трубы. Двухфазному потоку в условиях пневмотранспорта характерно неравномерное вертикальное распределение материала в поперечном сечении трубы [3]. Чем выше весовая концентрация, тем в большей мере материал транспортируется в нижней части трубопровода и тем больше скорость „скольжения“ воздуха относительно твердой фазы.

На рис. 3, а и 3, б приведены профили абсолютных и относительных скоростей, снятых при постоянном значении весовой концентрации, но различных средних скоростях транспорта.

При докритической скорости  $w_{ср.} = 12 \text{ м/сек}$  транспортируемый материал частично перемещается по дну трубы и вызывает дополнитель-

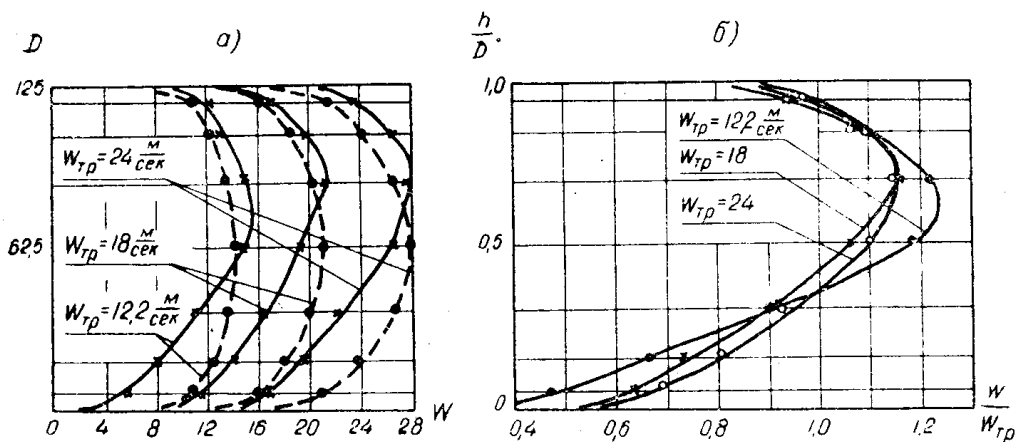


Рис. 3. Эпюры скоростей при транспорте пшеницы для постоянной концентрации  $\rho = 1,5$ : а) в абсолютных значениях скоростей; б) в относительных значениях скоростей.  
(— — —) чистый воздух; (—) пневмотранспорт

ное затормаживание потока в придонной его части. В этом случае подвергается существенной деформации нижняя половина профиля. Вся эпюра оказывается вытянутой вдоль трубы. Градиент скорости в ядре потока значительно возрастает.

Когда скорость потока выше критической (18–25 м/сек), весь материал транспортируется во взвешенном состоянии. С возрастанием скорости материал перемещается из нижней половины трубы в верхнюю, и тем в большей части поперечного сечения трубы достигается более равномерное распределение материала. Только в верхней части потока количество транспортируемого материала существенно меньше, чем в остальной его части. Поэтому в этой области поток оказывается менее заторможенным и максимум скорости смещается в верхнюю половину трубы.

Зависимость относительного смещения максимума скорости  $\frac{h_1}{r}$  ( $h_1$  — расстояние от оси трубы до положения  $w_{\max}$ ,  $r$  — радиус трубы) от весовой концентрации  $\rho$  и средней скорости потока представлены на рис. 4, а и б.

Как следует из графиков, относительное смещение максимума  $\frac{h_1}{r}$  вначале возрастает прямо пропорционально скорости транспорта, а при скоростях выше критической приращение  $\frac{h_1}{r}$  замедляется; зависи-

мость  $\frac{h_1}{r} = f(\rho)$  при  $w = \text{const}$  можно считать линейной в диапазоне измеренных концентраций при движении материала во взвешенном состоянии.

Необходимо отметить характерную особенность в изменении величины максимальной скорости в поперечном сечении трубы. Во всех проведенных опытах значения максимальной скорости при транспорте материала и при движении чистого воздуха для одного и того же

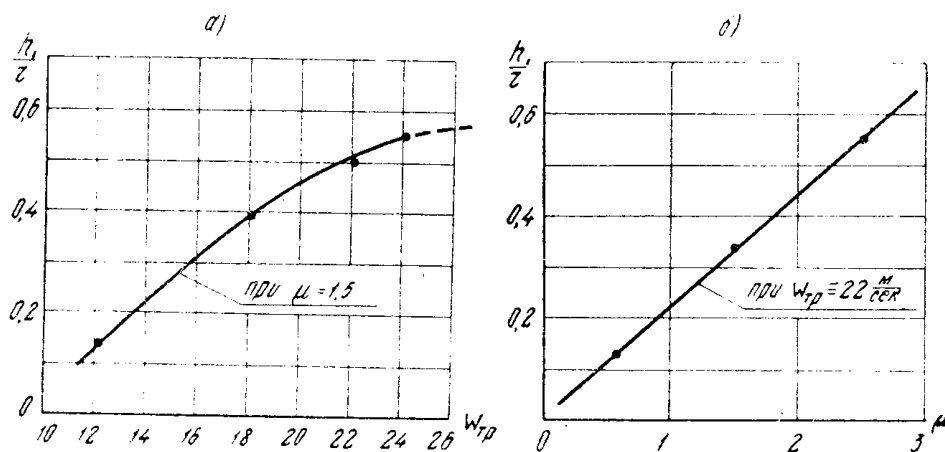


Рис. 4. Зависимость относительного смещения максимума скорости: а) в зависимости от средней скорости транспорта; б) в зависимости от средней концентрации потока.

расхода остаются одинаковыми и не зависят от весовой концентрации  $\rho$  (рис. 2 и рис. 5, в).

Решающее влияние на степень деформации эпюры скоростей в условиях пневмотранспорта оказывает характер распределения материала в поперечном сечении потока. Это положение полностью подтверждает опыты по снятию эпюры скоростей при пневмотранспорте кварцевого песка.

В работе [3] было установлено, что при пневмотранспорте кварцевого песка наблюдается достаточно равномерное распределение материала в поперечном сечении потока. Причем влияние скорости, концентрации и размера частиц на их распределение незначительно.

В таких условиях должно наблюдаться значительно меньшее искажение симметричности эпюры скоростей. Опыты с кварцевым песком для частиц двух размеров ( $d_3 = 0,42$  и  $d_3 = 0,715$  мм) при  $\rho = 1,5$  и  $w_{ср} = 25,5$  м/сек, приведенные на рис. 5, а, подтвердили указанное предположение.

На рис. 5, б дано сравнение эпюры безразмерных скоростей для песка и пшеницы при одних и тех же условиях транспорта.

Для транспортируемого материала, которому в этих условиях соответствует наибольшая неравномерность распределения, получается более существенная деформация профиля скоростей.

Все приведенные опыты выполнены на трубе со стабильной шероховатостью стенок. Однако на деформацию профиля скоростей при пневмотранспорте шероховатость также оказывает значительное влияние.

В работе [4], исследуя влияние шероховатости труб на величину гидравлического сопротивления в условиях пневматического транспорта, было указано, что возрастание гидравлического сопротивления с увеличением шероховатости сопровождается более равномерным распределением твердых частичек в поперечном сечении трубы. Такое изменение в характере распределения материала должно приводить к восстановлению симметрии профиля скоростей по мере увели-

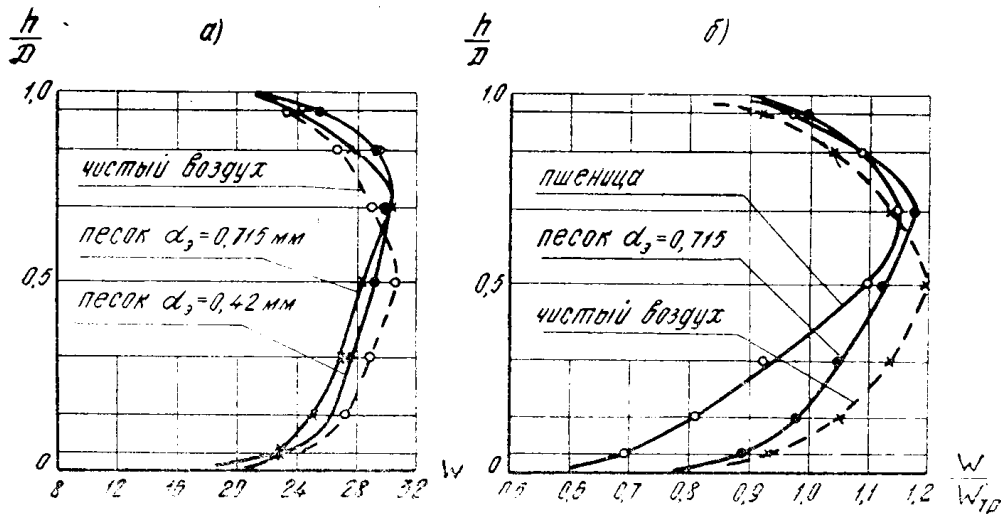


Рис. 5. а) Эпюры скоростей для кварцевого песка  $d_3=0,42\text{ мм}$ ,  $d_3=0,715\text{ мм}$  и чистого воздуха при концентрации  $\rho=1,5$  и средней скорости транспорта  $w_{тр}=25,5\text{ м/сек}$ ;  
 б) сравнительные эпюры безразмерных скоростей для песка  $d_3=0,715\text{ мм}$  и пшеницы при одних и тех же условиях транспорта:  $\rho=1,5$  и  $w_{тр}=25,5\text{ м/сек}$ .

чения шероховатости стенок. Ниже приводимые опыты иллюстрируют это положение.

На рис. 6, а и б, приведены сравнительные графики профиля абсолютных и безразмерных скоростей при транспорте пшеницы для „гладкой“ и шероховатой трубы при постоянной концентрации  $\rho=1,5$  и средней скорости  $w_{ср}=22\text{ м/сек}$ . Относительная шероховатость трубы составляла

$$\frac{\Delta}{D} = (0,6 \div 0,7) 10^{-3}.$$

Шероховатость внутренних стенок трубы создавалась искусственно общепринятым методом [4, 5].

Как следует из этих рисунков, для шероховатой трубы симметрия профиля скоростей оказывается менее деформированной, чем в тех же условиях, но в „гладкой“ трубе. Градиент скорости в ядре потока шероховатой трубы имеет меньшую величину, чем в „гладкой“. Однако в пристенной части градиент скорости в шероховатой трубе больше, вследствие уменьшения транспортируемого материала в этой области.

Если при транспорте такого материала, как пшеница, которая в „гладкой“ трубе распределяется довольно неравномерно по сечению потока, шероховатость оказывает существенное влияние на восстановление симметрии эпюры скоростей, то при транспорте песка влияние шероховатости стенок оказывается меньшим.

Выше было показано, что деформация профиля скоростей при транспорте песка происходит в меньшей степени, благодаря более равномерному распределению твердых частичек по поперечному сечению „гладкой“ трубы. Поэтому при увеличении шероховатости стенок трубопровода, существенного изменения эпюры не происходит. Однако, как следует из графика рис. 6, в, и в этом случае влияние шероховатости на профиль скоростей проявляется такое же, как при транспорте пшеницы, но менее ощутимо.

Небезынтересно сопоставить эпюры скоростей, снятые при транспорте пшеницы и кварцевого песка в шероховатых трубах (пунктирные кривые на рис. 6, б и 6, в). Из-за некоторого различия скоростей транспорта такой график не приведен, но из внешнего сопоставления

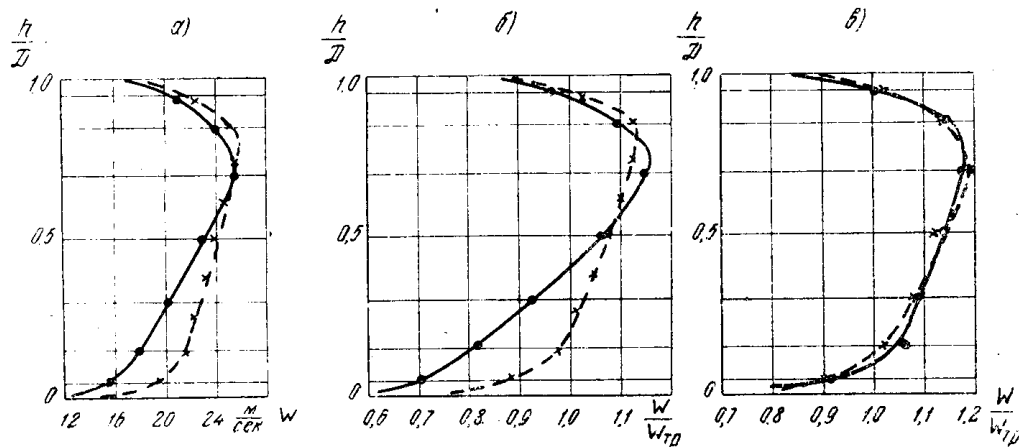


Рис. 6. Сравнительные эпюры скоростей для гладкой (—) и шероховатой (---) труб: а) профили абсолютных скоростей при транспорте пшеницы  $\rho = 1,5$   $\omega_{тр} = 22$  м/сек; б) то же в относительных значениях скоростей; в) профили относительных скоростей при транспорте кварцевого песка  $d_s = 0,42$  мм,  $\rho = 1,5$  и  $\omega_{тр} = 25,5$  м/сек.

можно заключить, что по мере возрастания шероховатости зависимость характера протекания профиля скоростей от характеристики транспортируемого материала становится менее значительной.

Анализ опытных данных по эпюрам скоростей при различных расходах и концентрациях, при различных характеристиках транспортируемого материала и трубопровода показывает, что характер профиля скоростей формируется в зависимости от распределения твердой взвеси по высоте поперечного сечения двухфазного потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Калинин. Пневматический транспорт. Влияние механических примесей к воздуху на потери в трубопроводе. Изд. Центрального аэро-гидродинамического института им. проф. Н. Е. Жуковского, 1936.
2. М. Е. Догин, В. П. Лебедев. Исследование сопротивлений при пневмотранспорте в горизонтальном трубопроводе. Труды ТЭМИИТа, т. 28, 1960.
3. М. Е. Догин, В. П. Лебедев. Экспериментальные данные по распределению твердой взвеси в горизонтальном трубопроводе. Труды ТЭМИИТа, т. 33, 1961.
4. М. Е. Догин, В. П. Лебедев. Шероховатость труб в условиях пневматического транспорта. Известия Вузов, Теплоэнергетика, № 7, 1962.
5. Ф. А. Шевелев. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. Госиздат литературы по строительству и архитектуре, 1953.