

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 681.3

Т.А. Рузова, канд. техн. наук,
А.П. Толстопят, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Л.А. Флеер

Днепропетровский национальный университет
им. О. Гончара, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: ruzov1973@bk.ru

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

Т.А. Ruzova, Cand. Sci. (Tech.),
А.Р. Tolstopyat, Cand. Sci. (Tech.),
Senior Research Fellow,
L.A. Fleyer

O. Gonchar Dnepropetrovsk National University,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: ruzov1973@bk.ru

METHOD OF EXPERIMENTAL EVALUATION VELOCITY OF PARTICLES IN TWO-PHASE FLOW

При рассмотрении гидро- и пневмотранспортных систем основным вопросом является определение скоростей частиц в каналах.

Цель. Целью исследования является определение скорости твердой дисперсной фазы как одного из основных параметров течения двухфазной среды – проведение отработки сопряжения регистрирующих опто-электронных датчиков непосредственно с персональным компьютером (через аудиовход) и разработка программного комплекса обработки сигнала с выдачей физических значений параметров на ПК.

Методика. Сигнал датчика оцифровывается в формате wav звукового файла и представляет собой последовательность импульсов, каждый из которых соответствует моменту прохождения частицы мимо окошка фотодатчика. Ввиду того, что схема снабжена двумя фотодатчиками, расстояние между которыми известно, скорость частицы может быть определена, исходя из оценки времени прохождения частицей этого расстояния, которое может быть определено как интервал между парой импульсов, соответствующих сигналам первого и второго датчиков.

Но, как правило, сигнал не имеет регулярной структуры, что обусловлено неравномерным вбросом частиц в канал. В связи с этим предложен алгоритм определения значений скоростей частиц, не зависящий от равномерности их вброса.

Результаты. Разработанная аппаратная схема и методы обработки результатов позволяют проводить исследования эффективности работы делителя потока при различных конструктивных особенностях, при высоких скоростях, не внося возмущающих элементов в поток газа-носителя.

Научная новизна. Предложен метод определения скорости дисперсной фазы. Разработана аппаратная схема и программный комплекс для обработки сигнала опто-электронного датчика для измерения скорости дисперсных частиц в канале фурмы. Проведено экспериментальное исследование по определению скорости движения частиц в прямых трубах при различных углах наклона канала путем программной обработки сигнала опто-электронного датчика.

Практическая значимость. Результаты исследований применяются при разработке конструкции пневмотранспортных систем подачи порошкового магния в чугуновозные ковши.

Ключевые слова: скорости частиц, дисперсная фаза, опто-электронный датчик, делитель потока, звуковой файл

Введение. Исследования движения многофазных потоков получили широкое распространение в связи с

развитием многих промышленных отраслей и, в частности, с развитием пневмо- и гидротранспортных систем. При создании теории гетерогенных сред важным направлением было описание взаимодействия дисперс-

© Рузова Т.А., Толстопят А.П., Флеер Л.А., 2012

ной среды с несущим потоком [1]. Другим практическим и не менее важным направлением было получение экспериментальных данных и создание методов расчета взаимодействия несущих потоков и дисперсной составляющей со стенками того или иного технологического аппарата. Пневмотранспортные системы являются довольно протяженными и разветвленными системами, в которых основной вклад в сопротивление и, соответственно, в потери энергии, вносит взаимодействие гетерогенных потоков со стенками каналов. В связи с этим при рассмотрении гидро- и пневмотранспортных систем основным вопросом является определение скоростей частиц в каналах. Этой проблеме и сопутствующим ей другим вопросам посвящено значительное количество работ, например, [2, 3]. Учитывая сложность движения переносимых потоком частиц и практическую непредсказуемость физических свойств (форма частиц, морфология поверхности, адсорбционные свойства), основным направлением исследования является эксперимент, который позволяет определять необходимые параметры.

Постановка задачи. Целью исследования является определение скорости твердой дисперсной фазы как одного из основных параметров течения двух-

фазной среды – проведение обработки сопряжения регистрирующих опто-электронных датчиков непосредственно с персональным компьютером (через аудиовход) и разработка программного комплекса обработки сигнала с выдачей физических значений параметров на ПК. Ранее нами проводилось экспериментальное исследование по определению скорости движения частиц в прямых трубах [4]. Регистрация скорости велась с помощью видеокамеры (по трекам частиц) на выходе из канала. Однако, для реальных конструкций многосопловых фурм, включающих прямой вертикальный канал, сопряженный с установленными под углом к нему насадками, такая схема станда малоинформативна.

Методы решения. Описание экспериментального станда. Экспериментальная установка (рис. 1) включает основным элементом трубу с внутренним диаметром $D=13$ мм (материал – нержавеющая сталь) и длиной 2,2 м. Труба располагалась вертикально. В верхней части трубы установлен плунжер-дозатор – 2 и расходомер – 3 с расходной шайбой, на вход которого подавался от компрессора сжатый воздух. Расход воздуха определялся по перепаду давления на расходной шайбе, регистрируемого манометрами 4 и 5.

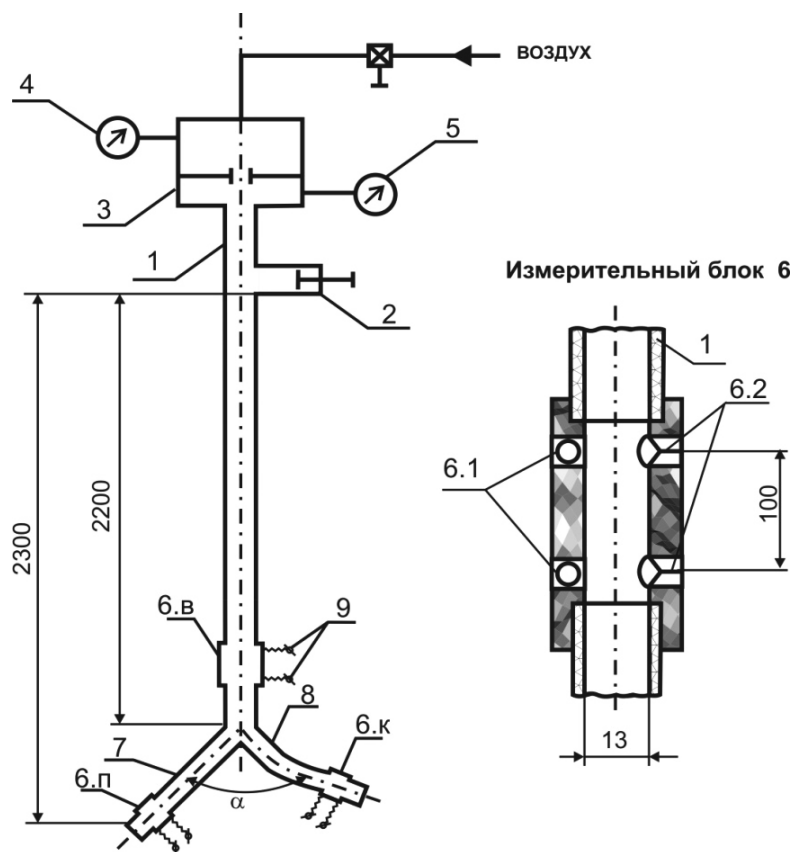


Рис. 1. Схема экспериментального станда: 1–труба $D = 13$ мм; 2–плунжер-дозатор; 3 – расходомер; 4, 5 – манометры; 6 – измерительный блок; 6.1 – источник излучения; 6.2 – светоприемник; 7– прямой патрубком; 8 – изогнутый патрубком; 9 – электрический выходной сигнал

Плунжер-дозатор 2 представлял собой цилиндрическую емкость с поршнем, в которую перед экспериментом загружались навески в 5–10г дисперсного ма-

териала. После подачи на установку требуемого расхода газа загруженная в дозатор навеска в течение 5–10с поршнем выгружалась (выталкивалась) в трубу.

В нижней части трубы установлен измерительный блок *б*, представляющий собой опто-электронный датчик с двумя уровнями регистрации (интервал 100 мм) проходящих частиц. Выход блока *б* соединен с делителем потока, который обеспечивал раздачу последнего по двум патрубкам, один из которых 7 прямой (\varnothing 9 мм), другой δ – изогнутый (\varnothing 9 мм).

В экспериментах использовались три конструкции делителя, различающихся углом α между нормальными к входным сечениям патрубков: $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

На выходе указанных патрубков, также, как и перед делителем, были установлены измерительные блоки, отличающиеся от описанного выше (входного) лишь диаметром канала – 9 мм, отвечающему внутреннему диаметру патрубка.

Электрический сигнал с измерительных блоков *б* поступал на блоки-преобразователи, через которые поступал на вход аудиоплаты компьютера. Поступивший в ПК сигнал с использованием программы АЦП оцифровывался и далее, по описанной ниже схеме, обрабатывался на ПК – находились искомые значения скоростей частиц.

В качестве дисперсного материала использовались гранулированный магний (Mg) и полистирол суспензионный. Оба дисперсных материала просеивались на ситах 1 мм и 2 мм. При этом частицы Mg имели шероховатую поверхность и неправильную произвольную форму. Частицы полистирола имели практически идеальную гладкую поверхность и форму шара.

Обработка сигнала измерительного блока. Методика статистической обработки эксперимента.

Полученный сигнал оцифровывается в формате wav звукового файла с частотой дискретизации $F_s = 96000$ Гц и представляет собой последовательность импульсов – пиков, каждый из которых соответствует моменту прохождения частицы мимо окошка фотодатчика. Ввиду того, что схема снабжена двумя фотодатчиками, расстояние l между которыми известно, скорость частицы может быть определена, исходя из оценки времени прохождения частицей этого расстояния, которое может быть определено как интервал между парой импульсов, соответствующих сигналам первого и второго датчиков.

Сигнал, лишенный шумов, представлен на рис. 2. Приведенный фрагмент отображает процесс последовательного прохождения двух частиц в канале и имеет структурированную форму: пики располагаются парами, расстояние между которыми значительно превосходит расстояние между пиками одной пары. Такие пары импульсов несложно выделить и вычислить скорость i -ой частиц как

$$v_i = \frac{l}{\Delta t_i},$$

где

$$\Delta t_i = t(n_i) - t(n'_i) = (n_i - n'_i) / F_s,$$

n_i, n'_i – отсчеты wav-файла, соответствующие импульсам при прохождении частицей i второго и первого датчиков.

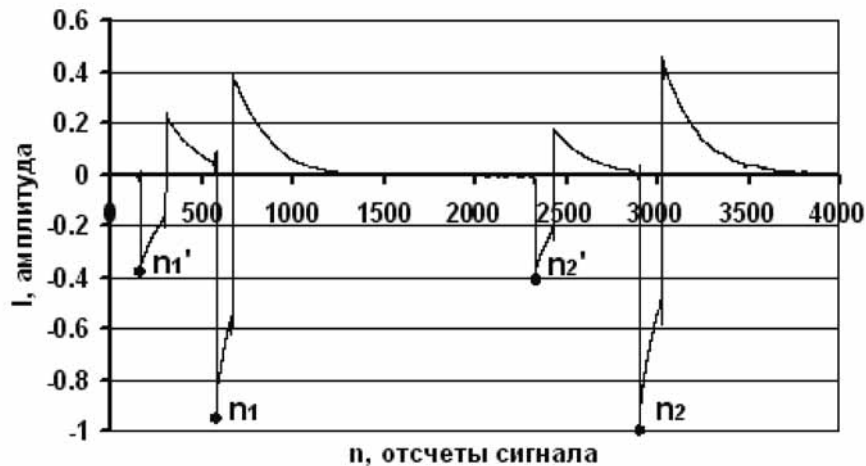


Рис. 2. Фрагмент структурированного сигнала фотодатчиков: n_1, n_2 – отсчеты, соответствующие прохождению частицами каждой из частиц второго датчика; n'_1, n'_2 – первого датчика

Но, как правило, сигнал не имеет регулярной структуры, что обусловлено неравномерным вбросом частиц в канал. Так сигнал на рис. 3, *а* характеризуется наличием непарных импульсов, обусловленных несрабатыванием датчика, на рис. 3, *б* проиллюстрирован случай взаимопересечения пар

импульсов при одновременном падении трех частиц, у сигнала на рис. 3, *в* – вообще отсутствует видимая парная структура импульсов. В связи с этим предложен алгоритм определения значений скоростей частиц, не зависящий от равномерности их вброса.

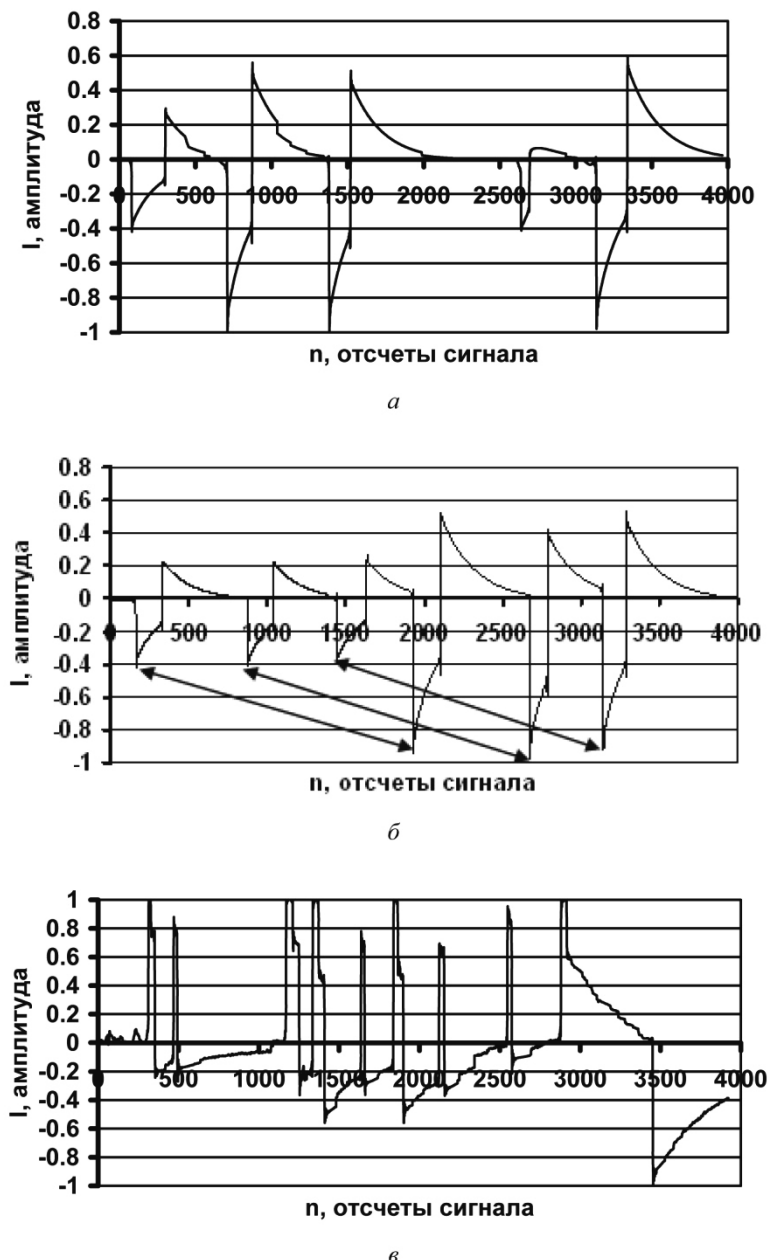


Рис. 3. Особенности структуры сигнала фотодатчиков при падении частиц: а – наличие непарных импульсов; б – взаимопересечение пар импульсов при одновременном падении трех частиц; в – отсутствие видимой парной структуры импульсов (стрелками соединены импульсы, соответствующие прохождению одной частицы)

Алгоритм работает с нижней (отрицательной) частью импульсов ввиду того, что их верхняя часть часто оказывается непоказательной (рис. 4).

Первым шагом является поиск точки P_1 , сигнал в которой становится значимым (рис. 4)

$$I(n) \leq I_0, \quad (1)$$

после чего осуществляется последовательный перебор точек до тех пор, пока сигнал остается значимым – выполняется условие (1). Путем введения порогового значения I_0 осуществляется частичная фильтрация сигнала, так как шумы, имеющие амплитуду меньше заданного порогового значения, выво-

дятся из рассмотрения (участок AB) и не будут ошибочно интерпретированы как импульсы датчиков. В выделенной последовательности P_1P_2 определяется точка P с минимальным значением сигнала, после чего переходим к поиску следующей значимой области. Таким образом, получаем множество пиковых значений сигнала.

Как видно на рис. 5, пики сигнала расположены группами, что обусловлено одновременным падением нескольких частиц. Поэтому на следующем шаге проводится разделение полученного множества пиков на K подмножеств последовательно расположенных пиков, расстояние между которыми находится во временном диапазоне, определяемом из ограниче-

ний, накладываемых на диапазон изменения скоростей при заданном режиме дутья

$$v_{\min} < v < v_{\max} ;$$

$$\frac{l}{v_{\max}} < \Delta t < \frac{l}{v_{\min}} .$$

Такие ограничения позволяют избежать грубых ошибок, возникающих при неравномерном вбросе частиц, когда пары импульсов, соответствующие нескольким частицам, располагаются слишком близко (соответствует значениям скоростей, большим $0,5 U_{\Gamma}$) либо слишком далеко друг от друга (соответствует значениям скоростей, меньшим скорости гравитационного падения U_g), что обусловлено несрабатыванием датчика.



Рис. 4. Низкая информативность верхней части импульсов



Рис. 5. Выделение импульсов wav-файла: АВ – шумовой участок сигнала; P₁P₂ – значимый сигнал; P – пиковое значение

В каждом подмножестве k ($k = \overline{1, K}$) вычисляется средняя скорость движения частиц

$$v^{(k)} = \frac{l}{\Delta t / (N^{(k)} - 1)},$$

где $N^{(k)}$ – число импульсов подмножества k .

Результирующая выборка будет включать скорость $v^{(k)}$, записанную $N^{(k)} - 1$ раз.

Так сигнал на рис. 6 разбит на 6 подмножеств импульсов. Рассчитанные значения скоростей приведены в таблице. Полученный массив скоростей обрабатывался статистически. Для этого был проанализирован ряд wav-файлов данных. Рассчитанные указанным выше методом скорости объединены в одну выборку. Выборка разбивалась на классы, число которых определяется по формуле

$$m = \sqrt{n} ,$$

где n – число элементов выборки [5, 6].

Таблица

Значения скоростей частиц для сигнала на рис. 6

Подмножества	$N^{(k)}$	$v^{(k)}$
1	7	25,30
		25,30
		25,30
		25,30
		25,30
		25,30
2	2	25,20
3	4	16,87
		16,87
4	2	29,27
5	1	–
6	1	–

Тогда ширина интервала $\Delta x = \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{m}$,

где X_{max} , X_{min} , соответственно, наибольшее и наименьшее значения выборки.

Сначала выборка разбивается на интервалы постоянной ширины Δx . Для каждого интервала определяется частота f_i – число скоростей, попавших в заданный интервал. При этом $\sum_{i=1}^m f_i = n$. В соответствии с принятыми схемами статобработки [5, 6], соседние интервалы с $f_i < 5$ объединяются. Разбив таким образом

выборку на классы и определив частоты f_i попадания элементов выборки для каждого класса, определяем серединные значения x_i^* (значения, лежащие посредине между границами интервала), частоты $f_i^* = f_i/n$, $i = \overline{1, m}$, ($\sum_{i=1}^m f_i^* = 1$). Данные о частотах

для выборки скоростей частиц полистирола в качестве примера представлены в виде графика на рис. 7.



Рис. 6. Сигнал, соответствующий одновременному падению нескольких частиц магния (область измерения – вертикаль, $Q_{\Gamma} = 21 \text{ м}^3/\text{ч}$, $u_{\Gamma} = 45 \text{ м/с}$, $\alpha = 30^\circ$): 1–6 – выделенные подмножества импульсов

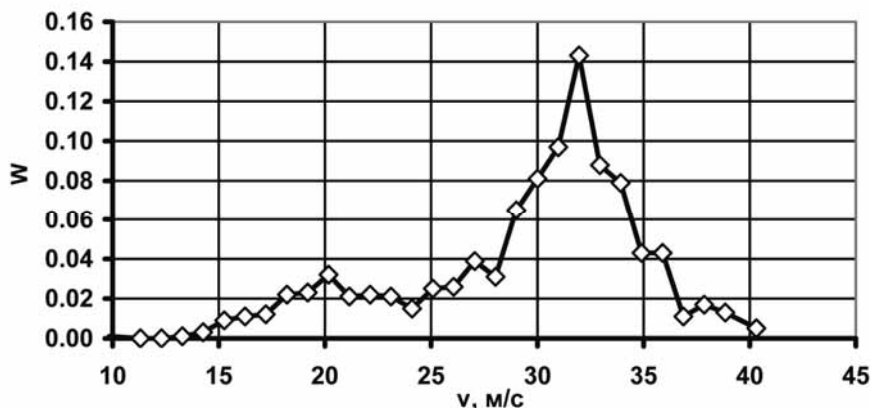


Рис. 7. Вероятное распределение скоростей частиц полистирола (область измерения – вертикаль, $Q_{\Gamma} = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$, $u_{\Gamma} = 65 \text{ м/с}$, $\alpha = 60^\circ$)

Выводы. Разработанная аппаратная схема и методы обработки результатов позволяют проводить исследования эффективности работы делителя потока при различных конструктивных особенностях, при высоких скоростях, не внося возмущающих элементов в поток газа-носителя.

Список литературы / References

1. Nigmatulin, R.I. (1995), “Drift flux model as approximation of two fluid model for two phase dispersed and slug flow in tube”, *Proc. of the 7-th Nuclear Thermo-Hydraulics Conf. (NURETH-7)*, New York, vol. 1, pp. 215–225.

2. Волошин А. И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / Волошин А.И., Пономарев Б.В. – К.: Наук. думка, 2001. – 248 с.

Voloshin, A.I. and Ponomarev, B.V. (2001), *Mekhanika pnevmotransportirovaniya sypushikh materialov* [Bulk Solids Pneumotransporting Mechanics], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

3. Рузова Т.А. Оперативный контроль параметров частиц дисперсных образований // Рузова Т.А., Карпов О.Н., Флеер Л.А. // Науковий вісник Національного гірничого університету.– Дніпропетровськ, 2004. – №2. – С. 83–88.

Ruzova, T.A., Karpov, O.N. and Fleyer, L.A. (2004), “Efficient evaluation of particles parameters in dispersed

structures”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.2, no. 83–88.

4. Толстопят А.П. Определение скорости движущихся частиц с помощью видеокамеры / Толстопят А.П., Елисейев В.И. // Оптические методы исследования потоков: труды XI международной научно-технической конференции. – М., 2011. – С. 101–103.

Tolstopyat, A.P., Yeliseyev, V.I. (2011), “Moving particles velocity evaluation by camcorder”, *Optical methods of flow investigation, Proc. of the 11th International Scientific and Technical Conference*, Moscow, Russia, pp. 101–103.

5. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей / Гнеденко Б.В. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 320 с.

Gnedenko, B.V. (2001), *Kurs teorii veroyatnostey* [Course of Probability Theory], Editorial URSS, Moscow, Russia.

6. Рудзит Я.А. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении / Рудзит Я.А., Плуталов В.Н. – М.: Машиностроение, 1991. – 304 с.

Rudzit, Ya.A. and Plutalov, V.N. (1991), *Osnovy metrologii, tochnost i nadezhnost v priborostroyenii* [Fundamentals of Metrology, Accuracy and Reliability at Instrument Making Industry], Mashinostroeniye, Moscow, Russia.

При розгляді гідро- і пневмотранспортних систем основним питанням є визначення швидкостей частинок у каналах.

Мета. Метою дослідження є визначення швидкості твердої дисперсної фази як одного з основних параметрів течії двофазного середовища – проведення відпрацювання сполучення оптико-електронних датчиків, що реєструють, безпосередньо з персональним комп’ютером (через аудіовхід) і розробка програмного комплексу обробки сигналу з видачею фізичних значень параметрів на ПК.

Методика. Сигнал датчика оцифровується у форматі wav звукового файлу і являє собою послідовність імпульсів, кожний з яких відповідає моменту проходження частинки повз віконце фотодатчика. Через те, що схема забезпечена двома фотодатчиками, відстань між якими відома, швидкість частинки може бути визначена, виходячи з оцінки часу проходження частинкою цієї відстані, що може бути визначена як інтервал між парою імпульсів, що відповідають сигналам першого й другого датчиків.

Але, як правило, сигнал не має регулярної структури, що обумовлено нерівномірним вкиданням частинок у канал. У зв’язку з цим запропоновано алгоритм визначення значень швидкостей частинок, що не залежить від рівномірності їх вкидання.

Результати. Розроблена апаратна схема й методи обробки результату дозволяють проводити дослідження ефективності роботи ділителя потоку при різних конструктивних особливостях, при високих швидкостях, не вносячи елементів, що збурюють, у потік газу-носія.

Наукова новизна. Запропоновано метод визначення швидкості дисперсної фази. Розроблено апаратну схему й програмний комплекс для обробки сиг-

налу оптико-електронного датчика для виміру швидкості дисперсних частинок у каналі фурми. Проведено експериментальне дослідження з визначення швидкості руху частинок у прямих трубах при різних кутах нахилу каналу шляхом програмної обробки сигналу оптико-електронного датчика.

Практична значимість. Результати досліджень застосовуються при розробці конструкції пневмотранспортних систем подачі порошкового магнію в чавуновозні ковші.

Ключові слова: швидкості частинок, дисперсна фаза, оптико-електронний датчик, ділитель потоку, звуковий файл

When dealing with hydro- and pneumatic transport systems the main point is to evaluate velocities of particles in channels.

Purpose. To evaluate solid dispersed phase velocity as one of the basic parameters of two-phase medium flow, to realize connection between registering opto-electronic sensor and computer (by means of audio input) and to design the software for signal treating and evaluating of the values of physical parameters.

Methodology. The signal from sensor is digitized to wav-format audio file and has a form of impulse sequence, each of them corresponds to the moment of passing the particle by the photo sensor window. Because of the fact that the system is supplied with two photo sensors and the distance between them is known, the particle velocity can be evaluated due to the estimation of the time spent by the particle on passing this distance, which can be evaluated as interval between impulse pair corresponding to the signals of first and second sensors. But, as a rule, the signal is not structured, because the particles are not thrown uniformly. That is why the algorithm for evaluating particles velocities which does not depend on the uniformity was proposed.

Originality. The method for evaluation of dispersed phase velocity was developed. The equipment circuit and software for treating the signal from optoelectronic sensor to evaluate velocities of disperse particles in tuyer channel were designed. The experimental investigation of particles velocity evaluation in straight pipes at different channel slope angles by program treatment of the signal received from optoelectronic sensor.

Findings. Developed equipment circuit and signal processing methods allow carrying out investigation in stream splitter operating efficiency at different constructional features, high velocities without bringing disturbing elements in gas-carrier stream.

Practical value. Results of investigation are implemented at designing of pneumatic transport system construction for powder magnesium supply to hot-metal ladle cars.

Keywords: particles velocities, dispersed phase, optoelectronic sensor, stream splitter, wave file

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсунюм. Дата надходження рукопису 08.12.11.