

К ВОПРОСУ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ГАЗА В ЗЕРНИСТЫХ СЛОЯХ ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ

Б.В. Панков¹, И.В. Рогов¹, И.Т. Степаненко²

*Кафедра "Гидравлика и теплотехника", ТГТУ (1);
Кафедра "Передающие и приемные радиоустройства", ТВАИИ (2)*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: динамические характеристики; зернистый слой; пневмометрический зонд; скорость газа; флуктуации скорости.

Аннотация: Построена математическая модель работы пневмометрического зонда в условиях пульсации скорости оживающего агента в зернистом слое. Решение уравнений, описывающих работу измерительной системы, проведено при различных частотах, значениях постоянного зонда, различных соотношениях постоянной и пульсационной составляющих скорости газа. Построены амплитудночастотные и фазочастотные характеристики.

В литературе по псевдооживлению имеется обширный отдел, посвященный изучению характера движения оживающего агента сквозь неподвижные и взвешенные зернистые слои. Несмотря на достаточно большой экспериментальный материал, не удается получить адекватные модели движения газовой фазы не только через псевдооживленные, но даже и неподвижные зернистые слои.

Осредненные по времени и (или) по пространству параметры движения оживающего агента сквозь зернистые слои не исчерпывают всех особенностей процесса. Характер микро- и макропульсаций, несмотря на значительные усилия исследователей, изучен пока недостаточно. Невыясненной остается и величина характерного масштаба пульсаций, оказывающих влияние на интенсивность обменных процессов в гетерогенных системах.

Исследования последних лет показали, что реальная структура струй, турбулентных вихрей может быть фрактальной [16]. Фрактальные структуры рассматриваются на основе анализа конкурирования роста соседних элементов потока. Наиболее интересным представляется анализ свойств локальной масштабной инвариантности (скейлинга) [15].

На этом фоне заметно оживление исследований в области течения газа через неподвижный и псевдооживленный слой [1-7, 9-13].

Для указанного анализа необходимы полные и достоверные данные по пространственным и временным полям скорости движения фаз в зернистых слоях, откуда вытекает необходимость иметь надежную измерительную технику.

В последние годы благодаря использованию кипящего слоя при сжигании угля, а также при утилизации отходов, была в значительной мере усовершенствована аппаратура для реализации этих процессов, что в свою очередь обусловило создание новых измерительных устройств. Подробный обзор измерительной техники для контроля аэрогидродинамических параметров дан в [9].

Для измерения скорости оживающего агента в неподвижных и псевдооживленных зернистых слоях использовались различные методы, которые можно разделить на зондовые и бесконтактные.

Зондирование слоя осуществлялось пневмометрическими зондами, термоанемометрами, электроискровыми анемометрами, зондами для внесения и отбора проб газа – трассера.

В качестве бесконтактных способов использовались кино- и видеосъемка [1, 2, 3], съемка в рентгеновских лучах, внешнее наблюдение за поведением частиц или газов – трассеров, сорбционный [17] и электродиффузионный методы [4], лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) [5-8].

Наиболее привлекательными с точки зрения “невмешательства” во внутреннюю структуру потока являются незондовые (бесконтактные) способы. Кино - и видеосъемка, съемка в рентгеновских лучах позволяют производить замеры скорости только исключительных газовых образований, например, пузырей, всплывающих в псевдоожигенном слое. Скорость фильтрующегося через массу зернистого материала газа этими способами не может быть зарегистрирована.

Внесение газа – трассера с последующим его обнаружением через отборники проб позволяет определить только среднюю скорость газа на отрезке между генератором и приемником трассера.

Особое место занимает ЛДА – метод, применение которого за последнее двадцатилетие позволило получить ряд новых результатов в теории турбулентности, пограничного слоя и др. Сущность ЛДА – метода заключается в измерении разности частот опорной и сигнальной волн, излучаемых лазером. Для наиболее распространенных лазерных анемометров фирм Dantec (Дания) и TSI (США) измерительный объем очень мал (цилиндр диаметром 0,07 и высотой 0,5.....2,6 мм) и позволяет измерять практически мгновенную скорость частиц – трассеров, например, микронных шариков смеси глицерина с водой, засеянных в потоке газа специальным генератором.

В чистых газовых потоках ЛДА – метод показал свою высокую эффективность, несмотря на некоторые сложности доказательства эквивалентности скорости газа и частиц – трассеров.

Имеется опыт применения [5] ЛДА – метода для определения пульсационных характеристик течения газа с твердыми частицами. Однако даже при малых объемных концентрациях твердой фазы (около 0,1%) не удается надежно разделить сигналы от твердой частицы и от частицы – трассера. Предпринимались попытки производить амплитудную селекцию с целью выделения полезного сигнала [13], связанные со значительными трудностями аппаратного оформления.

В высококонцентрированных гетерогенных системах, какой является псевдоожигенный слой, опыт применения ЛДА – метода для измерения флуктуаций скорости газа, по нашим сведениям, отсутствует.

Зондовые способы, к которым можно отнести измерение скорости пневмометрическими трубками, термоанемометрами прямого и косвенного накала, электроискровыми анемометрами имеют общий недостаток, – они вносят возмущение в поток и нуждаются в тарировке при переходе от чистого к гетерогенному потоку. Электроискровые анемометры, кроме того, имеют низкую стабильность показаний.

Если сравнивать пневмометрический и термоанемометрический способы измерения скорости в гетерогенных потоках, можно выявить присущие обоим методам недостатки – необходимость специальной тарировки из-за воздействия твердых частиц и инерционность. Воздействие твердых частиц на датчик наиболее сильно проявляется при использовании термоанемометров, работающих по принципу сноса тепла потоком с термодатчика: частицы неконтролируемым образом изменяют количество унесенного тепла.

Таким образом, пневмометрический способ, в котором органично связаны основные измеряемые параметры – скорость потока и его динамический напор, имеет в данном случае даже некоторые преимущества перед термоанемометрическим. Пневмометрический способ многократно применялся для измерения скоростных полей в многофазных системах.

В.П. Павлов [14] исследовал с помощью трубок Прандтля скорость газо-жидкостной смеси, при этом измерялся динамический напор как восходящего, так и нисходящего потоков. Поправочный коэффициент к показаниям трубок определялся экспериментально. Интересно, что эти гидрометрические трубки получили признание и в модифицированном виде использовались другими исследователями [10] под названием трубки Павлова.

J.H. Hills [10] использовал модифицированную трубку Павлова для измерения профилей скорости однофазного (жидкость) и двухфазного (газ - жидкость) потока в диапазоне скоростей 0,2-2,7 м/с. Калибровка трубки для однофазного потока в случае ее применения в двухфазных потоках дает заниженные результаты для высоких скоростей, завышенные – для низких.

Авторы [11] измеряли пневмометрическими трубками скорость газа и концентрацию частиц песка 150.....180 мкм в осесимметричной струе воздуха. Получены безразмерные профили скорости газа, отмечено, что присутствие твердых частиц в газовой струе заметно снижает интенсивность перемешивания в ней по сравнению с однородной струей.

Р.З. Адинберг и В.В. Дильман [12] использовали пневмометрический микрозонд собственной оригинальной конструкции для измерения скорости газа в неподвижном зернистом слое частиц размером 3.....4 мм, причем скорость определялась ими как вероятностная величина в зависимости от координаты.

Систематические исследования движения газа в псевдооживленном слое, основанные на результатах зондирования трубками Пито-Прандтля, проводились под руководством Н.Б. Кондукова и Л.И. Френкеля, некоторые материалы которых изложены в [19]. По результатам такого зондирования были выявлены, в частности, аномальные по высоте погруженного тела теплообменные зоны и выданы рекомендации по соответствующей коррекции теплообмена [21]. Одним из авторов настоящей статьи проводилась оценка динамических свойств пневмометрических систем с целью измерения флуктуаций скорости [20].

Проведенный на основе экспериментальных данных анализ [23] позволяет утверждать, что реальные скорости оживляющего агента в псевдооживленном слое заметно выше, чем это обычно считалось. Кроме того, выявлены причины [22] завышения пневмометрическими зондами величины постоянной составляющей скорости газа в пульсирующих потоках.

Таким образом, пневмометрический метод можно считать достаточно апробированным для применения в зернистых слоях.

Процесс колебания скорости газа в псевдооживленном слое представляет собой стационарный случайный процесс, поэтому для его изучения необходимо знать динамические свойства измерительной системы. В данном случае измерительная система состоит из пневмометрического зонда, соединительных каналов и присоединенной емкости с установленной в ней гибкой мембраной, изгиб которой измеряется вторичным электронным прибором.

При колебаниях скорости и давления в псевдооживленном слое с частотой порядка единиц герц вторичный прибор можно считать безынерционным, а преобразование сигнала в нем линейным.

Процесс наполнения присоединенной пневмоёмкости можно считать изотермическим, повышение давления в ней происходит за счет сжатия газа. Дополнительно вытекающие и втекающие из пневмоёмкости массы газа весьма невелики. Так, например, при повышении давления на носике приемника полного давления от атмосферного на 100 мм вод. ст. в пневмоёмкость дополнительно войдет около 1% массы газа, содержащегося в ней.

Будем считать, что наполнение пневмоёмкости осуществляется через гидравлический насадок с коэффициентом расхода ξ , тогда массовый расход газа через насадок определится как

$$\frac{dm(t)}{dt} = \rho \xi S \sqrt{\frac{2(P_{вх}(t) - P(t))}{\rho}}, \quad (1)$$

где m , ρ - масса и плотность втекающего газа; t - время; s - площадь поперечного сечения насадка; $p_{\text{вх}}(t)$ - динамическое давление газа; $p(t)$ - давление внутри пневмострелки.

Для объема газа V , содержащегося в емкости при неизменной температуре T , можно записать уравнение Менделеева - Клапейрона

$$P(t)V = \frac{m(t)}{\mu} RT, \quad (2)$$

дифференцирование которого по времени t дает

$$\frac{P(t)dV}{dt} + \frac{VdP(t)}{dt} = \frac{dm(t)RT}{dt \mu}, \quad (3)$$

где R - универсальная газовая постоянная; μ - молярная масса газа. При неизменном объеме пневмострелки $V = \text{const}$, $dV/dt = 0$, получим

$$\frac{VdP(t)}{dt} = \frac{dm(t)RT}{dt \mu}, \quad (4)$$

а с учетом (1)

$$\frac{VdP(t)}{dt} = \frac{RT}{\mu} \xi S \sqrt{2\rho} \sqrt{P_{\text{вх}}(t) - P(t)}. \quad (5)$$

Пусть на входе измерительной системы скорость меняется по гармоническому закону

$$W_{\text{вх}}(t) = A + B \sin(2\pi ft), \quad (6)$$

где f - частота, Гц; A - постоянная составляющая входного сигнала; B - амплитуда его периодической составляющей. Динамический напор газа на входе при этом будет

$$P_{\text{вх}} = \rho(A + B \sin(2\pi ft))^2 / 2. \quad (7)$$

На выходе измерительной системы будет зарегистрирована скорость $W(t)$, а соответствующее ей давление в емкости будет

$$P(t) = \rho W^2(t) / 2, \quad (8)$$

при этом

$$\frac{dP(t)}{dt} = \rho W(t) \frac{dW(t)}{dt}. \quad (9)$$

Подставим (7)-(9) в (5)

$$V\rho W(t) \frac{dW(t)}{dt} = \frac{RT\xi S\rho}{\mu} \sqrt{(A + B \sin(2\pi ft))^2 - W^2(t)}, \quad (10)$$

выберем начальные условия в виде $W(0) = A$, преобразуем (10), дополнив его необходимыми условиями:

$$K \left| W(t) \frac{dW(t)}{dt} \right| = \sqrt{(A + B \sin(2\pi ft))^2 - W^2(t)}, \quad (11)$$

где $K = V\mu / RT\xi S$ - постоянная измерительной системы, $\text{с}^2/\text{м}$.

Решение уравнения (11), проведенное численным методом Рунге-Кутты-Фельберга порядка 4 и 5 [18], показало его инвариантность к начальным условиям.

Типичный вид решения уравнения (11) приведен на рис.1, где a - входной сигнал по уравнению (6), b - выходной сигнал $W(t)$. В приведенном примере $A = 1$; $B = 1$; $K = 0,2$; $f = 2$. Как видно из графиков, выходной сигнал имеет ту же частоту, что и входной, но претерпевает следующие искажения:

- завышено среднее значение по сравнению с входным сигналом, в данном примере на 13,9%;
- заметно искажена его форма: положительная полуволна (относительно среднего значения) занимает более половины периода и ее амплитуда меньше чем у отрицательной полуволны;
- занижена амплитуда по сравнению с входным сигналом;
- выходной сигнал сдвинут по фазе относительно входного, в данном примере на 0,94 рад.

Среднее значение входного сигнала равно 1, выходного - 1,139, причины завышения среднего значения подробно проанализированы в [22]. Вкратце же можно сказать, что чем выше вклад пульсационной составляющей скорости, тем большая часть энергии пульсаций переходит в стационарную составляющую кинетической энергии потока, что наглядно проявляется при алгебраическом анализе уравнений (6) и (7).

На рис. 2 приведены расчетные зависимости среднего значения выходного сигнала W_{cp} от относительной доли B/A пульсационной составляющей скорости при различных значениях постоянной K измерительной системы и $A = 1$. Для малоинерционных трубок Пито-Прандтля, используемых в экспериментах по определению пульсаций скорости, значения постоянной K не превышали величины 0,1 ... 0,2. Из рис. 2 видно, что расчетное искажение W_{cp} не превышает 7 %, и в диапазоне пульсаций $B/A = 0,4 \dots 0,6$ существенно ниже этой величины. Для более инерционных приборов ($K = 0,5$ и $1,0$) эти искажения, как видно из рис. 2, доходят до 16 %.

Некоторые сложности в определении амплитудночастотных и фазочастотных характеристик вызывает искажение формы сигнала. За амплитуду выходного сигнала принята разность между максимальным значением выходного сигнала и его средним значением. Для определения фазового сдвига $\varphi(f)$ выходного сигнала его ординаты предварительно уменьшали на величину имеющегося завышения среднего значения.

На рис. 3 представлены амплитудночастотные характеристики $L(f)$ пневмометрических измерительных систем при тех же значениях постоянной K , а на рис. 4 их фазочастотные $\varphi(f)$ характеристики. Наиболее существенные изменения величины $L(f)$ и $\varphi(f)$ претерпевают при частотах до 2 Гц. При дальнейшем увеличении частоты динамика их изменения ослабевает. В целом анализ графиков, представленных на рис. 2-4, дает основания считать, что величины пульсаций скорости газа вполне могут быть измерены малоинерционными пневмометрами с последующей коррекцией в соответствии с рассчитанными динамическими характеристиками.

Следует заметить, что вопросы, связанные с нарушением структуры зернистого слоя из-за введения в него пневмометрических зондов, в настоящей статье не рассматривались. Полученные динамические характеристики пневмометрических систем могут быть положены в основу методики определения статистических свойств движения газа в зернистых слоях.

Список литературы

1. Kato Kynio, Takarada Chiaki, Jchida Masaru. Одновременные измерения пузырей и частиц в псевдооживленных слоях // Кагаку Когаку Ромбунсю. -1991. -17, №5. - С.1062-1065.
2. Rodes Martin, Ninea Hideaki, HIRAMA Ttoshimasa. Partikle motion at the wall of a cirkulating fluidized bed // Powder Technol. - 1992. - 70, №3. - Pp. 207-214.

3. Попов И.А., Ловягин В.А., Сайда Д.М., Матузаев К.Б. Оптический метод измерения истинной скорости пара и относительного движения фаз // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену. - М. - 1998. - Т.5. - С.76-78.
4. Кириллов В.А., Кузьмин В.А., Пьянов В.И., Ханаев В.М. О профиле скорости в неподвижном зернистом слое // ДАН СССР. - 1979. - Т.245, №1. - С.159-162.
5. Вараксин А.Ю., Полежаев Ю.В., Поляков А.Ф. Экспериментальное исследование пульсационных характеристик турбулентного течения в трубе газа с твердыми частицами // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену. - М. - 1998. - Т.5. - С.159-162.
6. Накоряков В.Е., Мухин В.А., Волков Б.И. Экспериментальное исследование поля скорости в неподвижном зернистом слое // Процессы переноса в аппаратах энергетических производств. - Новосибирск, 1985. - С.138-150.
7. Смирнов В.И. Автоматизированный двухкомпонентный лазерный доплеровский анемометр для измерения параметров турбулентности в трубе газовой стратификации // Измерительная техника. - 1996. - №6. - С.40-46.
8. Ринкевичус Б.С. Лазерная диагностика потоков. - М.: Знание. - 1988. - 64 с.
9. Welter Joachim, Hartge Ernst-Ulrich, Rensner Detlaf. Meßtechniken für Gas/Feststoff – Wirbelschichtreaktoren // Chem.-Ing. Techn. - 1990. - 62, N 8. - Pp. 605-613.
10. Hills J.H. Investigation into the suitability of a transverse Pitot tube for two phase flow measurements // Chem. Eng. Res. and Des. - 1983. - 61. №6. - Pp. 371-376.
11. Visvantath Subramanian, Narayanan Raman Measurements of velocity and concentration for a two-phase turbulent jet // Can.J. Chem. Eng. - 1984. - 62. - №3. - Pp. 314-318.
12. Адинберг Р.З., Дильман В.В. К измерению локальных скоростей потока в стационарном зернистом слое // ТОХТ. - 1985. - Т.19, №2. - С. 213-216.
13. Вараксин Ю.М., Полежаев Ю.В., Поляков А.Ф. Эффективность амплитудной селекции сигналов для исследования гетерогенных потоков с использованием ЛДА // Измерительная техника. - 1996. - №6. - С. 47-51.
14. Павлов В.П. Циркуляция жидкости в барботажном аппарате периодического действия // Хим. пром-сть. - 1965. - №9. - С. 698-700.
15. Федер Е. Фракталы. - М.: Мир, 1991. - 254 с.
16. Зосимов В.В., Лямшев Л.М. Фракталы и скейлинг в акустике // Акустический журнал. - 1994. - Т.40, №5. - С. 709-736.
17. Аэров М.Э., Годес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. - Л.: Химия, 1979. - 176 с.
18. Дьяконов В.П. Математическая система Maple V R3/R4/R5/ - М.: Солон, 1998. - 400 с.
19. Frenkel L.I., Kondukov N.B. Pankov B.V., Romanenko N.Ya., Tarov V.P. Intensification of surface to Bed Heat Transfer in a fluidized Bed at controlled Gas Distribution / Препринт докладов на 6 межд. конфер. по тепломассообмену. - Торонто, Канада. - 1978. - С.37-42.
20. Панков Б.В. Исследование флуктуаций скорости газа в псевдоожиженном слое и их связи с внешним теплообменом: Дисс. к.т.н. – Моск. ин-т хим. машиностроения. - М., 1976. - 162 с.
21. Pankov B.V., Nagornov S.A., Kusmin S.N., Cherepennikov I.A. Three-Phase Fluidized Bed for Quenching Steel Parts // Heat Transfer Research. - 1993. - Vol. 25, №8. - Pp. 925-929.
22. Панков Б.В. Об определении средней скорости пульсирующих газовых потоков пневмометрическими зондами // Вестник ТГТУ. - 2001. - Т. 7. - № 1. - С.... 55-59.
23. Панков Б.В. Кинематический анализ поля скорости газа в псевдоожиженном слое // Вестник ТГТУ. - 2000. - Т. 6. - №. 3. - С. 435-444.

**To the Question of Gas Velocity Measurement in Granular Layers
by Means of Pneumatic Metric Probes**

B.V. Pankov¹, I.V. Rogov¹, I.T. Stepanenko²

*Department "Hydraulics and Heat Engineering" TSTU, (1);
Department "Transmission and Receiving Radio-Devices",
Tambov Higher Military School of Aeronautical Engineering (2)*

Key words and phrases: dynamic characteristics; granular layer; pneumatic metric probe; gas velocity; fluctuations.

Abstract: Mathematical model of pneumatic metric probe functioning in conditions of velocity pulsation of fluidizing agent in granular layer is developed. Solution of equations, describing the work of measuring system is conducted under various frequencies, constant probe values, various correlation between constant and pulsation gas velocity components.

**Zur Frage der Abmessung der Gasgeschwindigkeit
in den körnigen Schichten durch pneumametrischen Sonden**

Zusammenfassung: Es sind das mathematische Modell der pneumametrischen Sonde unter Bedingungen der Pulsation der Geschwindigkeit des Verflüssigungsagenses in der körnigen Schichte gebaut. Die Lösung der Gleichungen, die die Arbeit des Meßsystems beschreibt, ist unter verschiedenen Frequenzen, Bedeutungen der ständigen Sonden, verschiedenen Beziehungen der ständigen und pulsierenden Komponenten der Gasgeschwindigkeiten, durchgeführt. Es sind die Amplitudenfrequenz- und Phasefrequenzcharakteristiken gebaut.

**Sur le problème de la mesure de la vitesse
de gaz dans les couches granulées par les sondes pneumatiques**

Résumé: On a construit le modèle mathématique du fonctionnement de la sonde pneumatique dans les conditions de la pulsation de la vitesse de l'agent liquéfiable dans une couche granulée. La résolution des équations qui décrivent le fonctionnement du système de mesure est réalisée avec de différentes fréquences et significations de la sonde, de différentes relations des composants, constant et pulsant, de la vitesse de gaz. On a construit les caractéristiques de l'amplitude et de la fréquence et celles de la fréquence de phase.
