

В. Н. Петров, С. Л. Малышев, К. А. Левин,
И. А. Махоткин

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОГО ГАЗА В ТРЁХФАЗНОЙ СРЕДЕ ПУЛЬПЫ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЁМНОГО РАСХОДА ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПРОДУКТА

Ключевые слова: трёхфазная пульпа, расход, плотность, концентрация.

В работе приведена математическая оценка влияния присутствия газовой фазы на результат измерений объёмного расхода двухкомпонентного продукта – смеси жидкой и твёрдой фаз в трёхфазной среде пульпы.

Keywords: three-phase slurry flow rate, density, concentration.

The paper shows the mathematical assessment of the presence of the gas phase on result of measurement of volume consumption is a two component product - mixtures of liquid and solid phases in three-phase environment is obtained.

Вопрос взаиморасчётов на горнообогатительных предприятиях, решаемый при приёмке-передаче трёхфазной пульпы в трубопроводной транспортной системе различными производственными подразделениями, сегодня представляет собой весьма сложную задачу [1]. Связано это с тем, что для определения параметров потока, состоящего из трёх фаз (газ, вода и твёрдые частицы), требуется измерения семи параметров среды: плотности двух фаз и трёх значений скорости, а так же давления и температуры [2,3,4,5,6].

Сегодня на рынке отсутствуют приборы по учёту каждой фазы отдельно в смеси трёхфазной пульпы.

Авторами в работе [7] представлена схема устройства для измерений расхода и плотности двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде пульпы (рис.1), которая включает четыре первичных измерительных преобразователя – расхода и уровня 1, плотности 2 и давления 3. Сигналы от всех четырёх преобразователей поступают на вычислительное устройство 5, на выходе которого имеется измеритель расхода и плотности двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде 4.

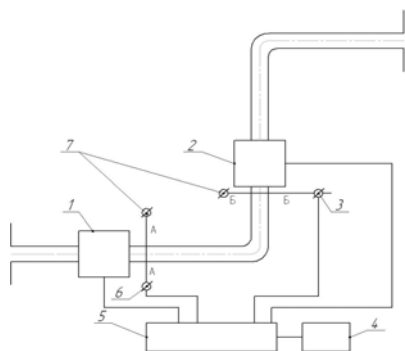


Рис. 1 - Схема устройства для измерений расхода и плотности двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде пульпы

Измерения давления в сечениях А-А и Б-Б необходимы для компенсации параметров газовой фазы ρ_g , так как величина давления в этих сечениях будет разной.

Реализация данной схемы у поставщика и потребителя требует сравнительной оценки погрешности измерений приборов контроля трёхфазной среды пульпы, установленных в различных производственных подразделениях горнообогатительных предприятий.

С целью определения влияния свободного газа в объёме трёхфазного пульпового продукта у приемем следующие допущения:

- режим течения трёхфазной среды является установившимся, отсутствуют технологические потери трёхфазной среды между измерительными участками поставщика и потребителя, т.е. участок магистрального пульповода представляет собой герметизированный трубопровод;
- между измерительными участками поставщика и потребителя отсутствуют химические реакции, способные изменить плотность твёрдых и жидких компонентов трёхфазной среды;
- время отсчёта показаний по расходомерам поставщика и потребителя синхронизировано, интервалы времени между началом и завершением рассматриваемого измерения у расходомеров потребителя и поставщика одинаковы;
- интервал времени осреднения достаточно велик, чтобы избежать влияния пульсаций расхода и неоднородности среды;
- температура и давление трёхфазной среды между расходомером и плотномером в пределах одного измерительного участка являются постоянными величинами;
- при течении трёхфазного потока отсутствуют проскальзывания фаз друг относительно друга.

Массовый расход трёхфазной среды $G_{тс}$ представим в виде суммы составляющих её компонентов:

$$G_{тс} = G_{тф} + G_{жф} + G_{гф}, \quad (1)$$

где $G_{тф}$, $G_{жф}$ и $G_{гф}$ - соответственно массовые расходы твёрдой, жидкой и газовой фаз.

Первые два слагаемых представляют собой массовый расход двухкомпонентного продукта пульпы, состоящей из твёрдой и жидкой фаз:

$$G_{п} = G_{тф} + G_{жф}, \quad (2)$$

Согласно закона сохранения массы можно записать:

$$G_{тс1} = G_{тс2} = G_{тс}, \quad (3)$$

где $G_{тс1}$ - массовый расход трехфазной среды у поставщика;

$G_{тс2}$ - массовый расход трехфазной среды у потребителя.

Далее по тексту индекс 1 относится к поставщику, а 2 – к потребителю.

С учётом выражений (1) и (2), согласно равенства (3), получим:

$$G_{н1} + G_{гф1} = G_{н2} + G_{гф2}, \quad (4)$$

Формула для определения массового расхода имеет вид:

$$G_k = \frac{M_{ki}}{\tau_i}, \quad (5)$$

где M_{ki} - масса k – той фазы при i – том измерении;

τ_i – интервал времени i – того измерения.

Массу каждой фазы в потоке запишем в виде:

$$M_{ki} = V_{ki} \cdot \rho_{ki}, \quad (6)$$

где V_{ki} - объем k – той фазы при i – том измерении;

ρ_{ki} - плотность k – той фазы при i – том измерении, приведенная к условиям измерений объема.

Используя соотношения (5) и (6), выражения (4) запишем в виде:

$$V_{н1} \cdot \rho_{н1} + V_{гф1} \cdot \rho_{гф1} = V_{мс1} \cdot \rho_{мс1}, \quad (7)$$

$$V_{н2} \cdot \rho_{н2} + V_{гф2} \cdot \rho_{гф2} = V_{мс2} \cdot \rho_{мс2}, \quad (8)$$

Принимая условия:

$$\rho_{н1} = \rho_{н2} = \rho_n, \quad (9)$$

$$V_{н1} = V_{н2} = V_n, \quad (10)$$

Для газовой фазы справедливо следующее соотношение:

$$V_{гф1} \cdot \rho_{гф1} = V_{гф2} \cdot \rho_{гф2} = M_{гф}, \quad (11)$$

Аналогично уравнению (4) и, считая, что масса трехфазной среды величина постоянная, $M_{тс1} = M_{тс2} = M_{тс}$, можно записать:

$$V_{мс1} \cdot \rho_{мс1} = V_{мс2} \cdot \rho_{мс2} = M_{тс}, \quad (12)$$

Разделив обе части уравнения (7) на объем трехфазной среды по показаниям расходомера поставщика $V_{мс1}$, получим:

$$\frac{V_{н1} \cdot \rho_{н1}}{V_{мс1}} + \frac{V_{гф1} \cdot \rho_{гф1}}{V_{мс1}} = \rho_{мс1} \quad (13)$$

Надо заметить, что:

$$\frac{V_{н1}}{V_{мс1}} = \varphi_{н1}, \text{ а } \frac{V_{гф1}}{V_{мс1}} = \varphi_{гф1}, \quad (14)$$

где $\varphi_{н1}$, $\varphi_{гф1}$ - объемные доли пульпы и газовой фазы соответственно, в долях единицы.

Левая часть уравнения (7), записанная с учётом выражений (9) и (14), примет вид:

$$\varphi_{н1} \cdot \rho_n + \varphi_{гф1} \cdot \rho_{гф1} = \rho_{мс1}, \quad (15)$$

где соблюдается условие:

$$\varphi_{н1} + \varphi_{гф1} = 1, \quad (16)$$

и из которого следует выражение для объемной доли газа:

$$\varphi_{гф1} = 1 - \varphi_{н1}, \quad (17)$$

Тогда, с учетом (17) выражение (15) примет вид:

$$\rho_{мс1} = \varphi_{н1} \cdot \rho_n + (1 - \varphi_{н1}) \cdot \rho_{гф1}, \quad (18)$$

Здесь $\rho_{мс1}$ - плотность трехфазной среды, измеренная плотномером поставщика.

Используя рассуждения, аналогичные вышеизложенным, для уравнения (8) получим:

$$\rho_{мс2} = \varphi_{н2} \cdot \rho_n + (1 - \varphi_{н2}) \cdot \rho_{гф2}, \quad (19)$$

Из уравнения газового состояния имеем:

$$\rho_{гф2} = \rho_{гф1} \cdot \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2 K}, \quad (20)$$

где P - абсолютное давление трехфазной среды, МПа.

T - абсолютная температура, К.

K – коэффициент сжимаемости газа, безразмерная величина, определяется по компонентному составу газа в лабораторных условиях.

Для упрощения расчётов введём переменную:

$$\beta = \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2 K}, \quad (21)$$

С учётом (21) равенство (20) принимает вид:

$$\rho_{гф2} = \rho_{гф1} \cdot \beta, \quad (22)$$

Вычитая из уравнения (19) уравнение (18), с учетом соотношений (20) и (22) получим:

$$\rho_{мс2} - \rho_{мс1} = \varphi_{н2} \cdot \rho_n + (1 - \varphi_{н2}) \rho_{гф2} - \varphi_{н1} \cdot \rho_n - (1 - \varphi_{н1}) \rho_{гф1} = \quad (23)$$

$$= \rho_{гф1} (\varphi_{гф2} \cdot \beta - \varphi_{гф1}) - \rho_n (\varphi_{гф2} - \varphi_{гф1})$$

Уравнение (23) можно представить в виде:

$$\rho_{мс2} = \rho_{мс1} + \rho_{гф1} (\varphi_{гф2} \cdot \beta - \varphi_{гф1}) - \rho_n (\varphi_{гф2} - \varphi_{гф1}) \quad (24)$$

Из тождества (12) определяем $V_{мс2}$:

$$V_{мс2} = \frac{V_{мс1} \cdot \rho_{мс1}}{\rho_{мс2}} \quad (25)$$

Подставляя выражения (24) в уравнение (25), получим:

$$V_{мс2} = \frac{V_{мс1} \cdot \rho_{мс1}}{\rho_{мс1} + \rho_{гф1} (\varphi_{гф2} \cdot \beta - \varphi_{гф1}) - \rho_n (\varphi_{гф2} - \varphi_{гф1})} = \quad (26)$$

$$= \frac{V_{мс1}}{1 + \frac{\rho_{гф1}}{\rho_{мс1}} (\varphi_{гф2} \cdot \beta - \varphi_{гф1}) - \frac{\rho_n}{\rho_{мс1}} (\varphi_{гф2} - \varphi_{гф1})}$$

или:

$$V_{мс2} = \frac{V_{мс1}}{\Delta}, \quad (27)$$

где

$$\Delta = 1 + \frac{\rho_{гф1}}{\rho_{мс1}} (\varphi_{гф2} \cdot \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2 K} - \varphi_{гф1}) - \frac{\rho_n}{\rho_{мс1}} (\varphi_{гф2} - \varphi_{гф1}) \quad (28)$$

В трехфазном потоке присутствует свободный газ, объём которого существенно зависит от температуры и давления, как это следует из зависимости (26).

Анализ влияния свободного газа в трёхфазной среде пульпы показывает, что даже при обеспечении требуемой инструментальной точности средств измерений объёмного расхода трехфазной среды, и при исключении технологических потерь в магистральном пульпопроводе, количественно оценить разность в показаниях приборов учёта объёмного расхода двухкомпонентного продукта у поставщика и у потребителя пульпы представляет сложную задачу, особенно при отсутствии средств

отбора проб газа и определения коэффициента сжимаемости и плотности газа, однако, сравнительная оценка подтверждает факт, что измерения объёмного расхода поставщика и потребителя пульпы могут отличаться в Δ раз. Это связано с тем, что давление в магистрали поставщика существенно выше, чем у потребителя. Например, в случае когда $P_1 = 0,4$ МПа, а $P_2 = 0,14$ МПа, объём газовой фазы увеличивается в 2,85 раз, что в итоге приводит к существенным различиям в показаниях расходомеров-счётчиков у поставщика и потребителя.

Литература

1. В.Г. Соловьёв, В.Н. Петров, С.Л. Малышев, И.А. Кирпичников, И.А. Махоткин Вестник КГТУ, №3, 13(2014).
2. П.П. Кремлёвский, Измерение расхода многофазных потоков. Л.:Машиностроение. 1982.-214с.
3. И.Р. Ягудин, В.Н. Петров, А.Ф. Дресвянников Вестник КГТУ, № 4, т.16, 203 (2013).
4. В.Ф. Медведев, А.Г. Удодов Приборы и системы управления, №10, 18 (1972).
5. А.И. Шегедин Об одном способе автоматического измерения расходов компонентов в газированных пульпах. Львов: Вища школа. 1965.- 43-46с.
6. П.П. Кремлёвский Расходомеры и счётчики количества. Справочник. Л.:Машиностроение. 1989г.-702с.
7. В.Н. Петров, С.Л. Малышев, И.А. Кирпичников, И.А. Махоткин Вестник КГТУ, №6, 235 (2014).

© **В. Н. Петров** – к.т.н., доц. кафедры менеджмента КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, ot9vniir@yandex.ru; **С. Л. Малышев** – научный сотрудник НИО-9 ФГУП «ВНИИР», pamir.61@mail.ru; **К. А. Левин** - начальник НИО-9 ФГУП «ВНИИР» pamir.61@mail.ru; **И. А. Махоткин** - канд. тех. наук, доц. каф. оборудования химических заводов КНИТУ, lidanet@inbox.ru.

© **V. N. Petrov** - associate professor, KNRTU-KAI, name A.N. Tupolev, ot9vniir@yandex.ru; **S.L. Malyshev** - the scientific worker SRD-9 All-Russian scientific research institute of the expenditure, pamir.61@mail.ru; **K.A. Levin** - the chief All-Russian scientific research institute of the expenditure; **I. A. Mahotkin** - associate professor, KNRTU, lidanet@inbox.ru.