

В. Н. Петров, С. Л. Малышев, И. А. Кирпиченков,
И. А. Махоткин

ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА И ПЛОТНОСТИ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПРОДУКТА В ТРЁХФАЗНОЙ СРЕДЕ ПУЛЬПЫ

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

В представленной работе предложен метод измерений расхода двухкомпонентного продукта – смеси жидкой и твёрдой фаз, с присутствием газовой фазы, представляющий собой пульповый продукт - сырьевой поток концентратов, транспортируемый по трубопроводам между подразделениями горно-обогатительных предприятий.

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

In this work a method for measuring flow rate of two-component product-a mixture of liquid and solid phases, with presence of gas phase, which is a product of syrevoj stream be concentrates, transported by pipeline between units of ore processing plants.

Вопрос взаиморасчётов, возникший при реструктуризации крупных предприятий привёл к проблеме достоверного метрологического обеспечения измерений расхода и плотности продукции, передаваемой и принимаемой продукцией различными производственными подразделениями. Так, для горно-обогатительных предприятий особую трудность представляет определение расхода и плотности пульпы, поступающей в трубопроводную транспортную систему после флотационных машин, для случаев, когда она содержит газ. При этом образуется трёхфазная среда – смесь твёрдой, жидкой и газообразной фаз, или иначе двухкомпонентный продукт в трёхфазной среде пульпы. Объёмное содержание газовой фазы в трёхфазной пульпе φ_2 может составлять до 20%, а иногда оно может быть и выше. Пренебрежение учёта влияния газосодержания при сведении сырьевых балансов производственными подразделениями, как показано в работе [1], может привести к значительному расхождению данных измерений массового расхода и количества передаваемой продукции.

Для определения параметров потока, состоящего из трёх фаз, в режиме реального времени необходимо распознать три компонента – твёрдый, жидкий и газообразный, проходящих через средства измерений, что, в свою очередь, требует системы измерений фракционного состава, способного различать фазы в общем потоке. Надо заметить, что пульповый продукт транспортируется в ограниченном трубопроводном пространстве, следовательно, зная содержание двух фаз, можно рассчитать третью. Отсюда следует, что для описания трёхфазного потока необходимы измерения скоростей трёх фаз, двух плотностей и, для приведения к стандартным условиям, значения давления и температуры потока.

Из вышесказанного следует, что измерительная система должна одновременно выполнить семь измерений, что усложняет реализацию поставленной задачи.

Сегодня на рынке отсутствуют приборы по учёту отдельно каждой фазы в рассматриваемой трёхфазной среде. Для нефтедобывающей отрасли

разработаны и эксплуатируются многофазные расходомерные установки, позволяющие определить покомпонентный состав сырой нефти – нефти, воды и попутного нефтяного газа [2,3].

В данной работе представлены методы определения параметров двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде пульпы с учётом приборной базы, имеющейся на мировом рынке.

Рассмотрим течение трёхфазной пульпы в трубопроводной транспортной системе горно-обогатительных предприятий. После процесса флотации пульпа содержит пузырьки газа, в результате чего образуется газированная пульпа. В дальнейшем при движении по трубопроводам пузырьки всплывают и образуют структуру расслоённого течения (незаполненного канала). В работе [4] показано, что после флотации диаметр воздушных пузырьков составляет от 1 до 5 мм, а скорость их всплытия в соответствии с работой [5] составляет порядка 0,25 м/с. Как показано в работе [6] максимальная скорость течения двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде пульпы не превышает $v_c = 4$ м/с.

Следовательно, при средней скорости течения пульпы 5 м/с через 10 м вниз по потоку в трубопроводе диаметром 0,5 м образуется расслоённое течение.

Такой подход, как сказано выше, справедлив, если не учитывать воздействие химического реагента, используемого в технологическом процессе флотации. С учётом добавки скорость всплытия воздушных пузырей может существенно уменьшиться, при этом расслоённое течение может образоваться через 50 м и более. Следовательно, в трубопроводе возможны два режима течения трёхфазной пульпы – газированный (пузырьковый) и расслоённый.

Рассмотрим методы измерений параметров трёхфазной пульпы для этих двух случаев течения применительно к приборам учёта, имеющимся сегодня на рынке. Запишем уравнения по определению средней скорости v_c и плотности ρ_c трёхфазной среды пульпы

$$v_c = \varphi_m v_m + \varphi_z v_z + [1 - (\varphi_m + \varphi_z)] v_{ж}, \quad (1)$$

$$\rho_c = \varphi_m \rho_m + \varphi_z \rho_z + [1 - (\varphi_m + \varphi_z)] \rho_{ж}, \quad (2)$$

где φ_m - объёмная концентрация твёрдой фазы;

$v_m, v_z, v_{ж}$ - соответственно, скорость твёрдой, газовой и жидкой фаз;

$\rho_m, \rho_z, \rho_{ж}$ - соответственно, плотность твёрдой, газовой и жидкой фаз.

Как следует из уравнения (1), при течении трёхфазной пульпы необходимо учитывать скольжение между отдельными фазами, имея в виду, что скорость твёрдой фазы v_m меньше скорости жидкости $v_{ж}$, которая, в свою очередь, меньше скорости газа v_z , если последний не диспергирован в ней.

В работе [7] представлена схема устройства, позволяющего произвести измерения расхода и плотности двухкомпонентного продукта. В соответствии со схемой устройства производится измерение пяти параметров трёхфазной смеси в двух сечениях потока газированной пульпы, с объёмным содержанием газа в условиях измерений 2-6%. Схема включает пять измерительных преобразователей, три из которых – преобразователи расхода 1, плотности 2 и давления 7 установлены в сечении А-А (рис.1). На достаточном удалении от сечения А-А, в сечении Б-Б размещены преобразователи расхода 3 и давления 4. Сигналы от всех преобразователей поступают на вычислительное устройство 6, на выходе которого имеется измеритель концентрации пульпы 5, принцип работы которого основан на том, что разность между объёмными расходами ΔQ в сечениях А-А и Б-Б зависит от расширения газовой фазы при уменьшении давления от P_A в сечении А-А до P_B в сечении Б-Б. С учётом ряда допущений автор работы приводит уравнение для определения концентрации газа φ_z в сечении А-А.

$$\varphi_z = \frac{(Q_B - Q_A) P_B}{Q_A (P_A - P_B)} \quad (3)$$

где Q_A и Q_B - соответственно, объёмные расходы пульпы в сечениях А-А и Б-Б;
 P_A и P_B - соответственно, давление в сечениях А-А и Б-Б.

Из уравнения (2) следует выражение для определения концентрации твёрдой фазы

$$\varphi_m = \frac{(\rho_c - \rho_{ж}) + \varphi_z (\rho_{ж} - \rho_z)}{\rho_m - \rho_{ж}} \quad (4)$$

Если учесть, что $\rho_{ж} \gg \rho_z$, тогда

$$\varphi_m = \frac{\rho_c - \rho_{ж} (1 - \varphi_z)}{\rho_m - \rho_{ж}} \quad (5)$$

Массовый расход твёрдой фазы G_m в работе определяется в зависимости от объёмного расхода смеси Q_c по уравнению

$$G_m = \frac{Q_c \varphi_m \rho_m v_m}{v_c} \quad (6)$$

Решая уравнение (3) совместно с уравнениями (5) и (6) получено выражение для определения массового расхода твёрдой фазы

$$G_m = \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_{ж}} \left[Q_A (\rho_c - \rho_{ж}) + \frac{P_B (Q_B - Q_A)}{P_A - P_B} \right] \quad (7)$$

Выражение (7) справедливо при равенстве скоростей фаз, в него входят пять величин, которые измеряются в соответствии со схемой устройства, представленной на рис. 1.

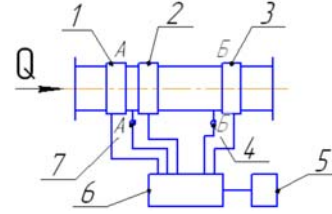


Рис. 1 - Схема устройства для измерений расхода твёрдого компонента в газированной пульпе

Промышленные испытания устройства показали, что предельная приведённая погрешность измерения массового расхода твёрдой фазы не превышает 4%.

Схем устройств измерения расхода твёрдой фазы в газированной пульпе при объёмном содержании газовой фазы более 6%, а также при расслоённом течении пульпы в канале, в литературе нет. Данная проблема, как было сказано выше, появилась в последнее время в связи с реорганизацией горно-обогатительных предприятий.

Авторами данной статьи предложена схема определения расхода и плотности двухкомпонентного продукта (смесь жидкой и твёрдой фазы) в трёхфазной пульпе.

Для двухкомпонентного продукта пульпы в трёхфазной среде можно записать

$$\varphi_n \rho_n = \varphi_m \rho_m + [1 - (\varphi_m + \varphi_z)] \rho_{ж}, \quad (8)$$

где φ_n - концентрация пульпы в трёхфазной среде;
 ρ_n - плотность пульпы в трёхфазной среде.

С учётом выражения (8) уравнение (2) примет вид

$$\rho_c = \varphi_z \rho_z + \varphi_n \rho_n \quad (9)$$

или

$$\rho_c = \varphi_z \rho_z + (1 - \varphi_z) \rho_n \quad (10)$$

Используя выражение (10) после простых преобразований можно получить формулу для определения плотности пульпы ρ_n

$$\rho_n = \frac{\rho_c - \varphi_z \rho_z}{1 - \varphi_z} \quad (11)$$

С целью определения расхода и уровня пульпы в трубопроводе используем ультразвуковой прибор 1 (рис.2), позволяющий определить расход и уровень двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде L (рис.3). Зная уровень пульпы L можно определить площадь трубопровода, занимаемой газом, S_z , который можно вычислить как разницу площади сектора круга $S_{сек}$ с углом 2α и площади треугольника $S_{мп}$.

$$S_z = S_{сек} - S_{mp} \quad (12)$$

$$S_{сек} = \frac{R^2 \alpha}{2} \quad (13)$$

$$S_{mp} = \frac{R(L - R) \sin \alpha}{2} \quad (14)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{L - R}{R}\right) \quad (15)$$

где R – радиус трубопровода;

Здесь α измеряется в радианах. Следовательно, концентрация газовой фазы определяется по формуле

$$\varphi_z = \frac{S_z}{S}, \quad (16)$$

где S – площадь проходного сечения трубопровода.

Схема устройства для измерения расхода и плотности двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде пульпы (рис.2) включает четыре измерительных первичных преобразователя, – преобразователи расхода и уровня 1, плотности 2 и датчик 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.

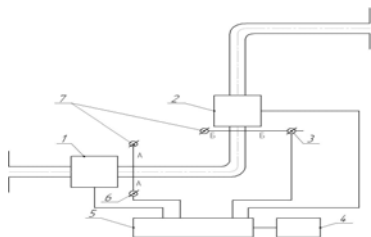


Рис. 2 - Схема устройства для измерений расхода и плотности двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде пульпы

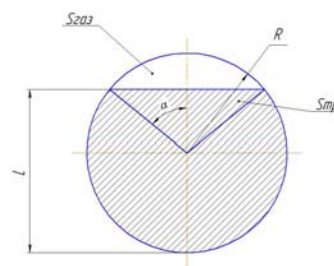


Рис. 3 - Схема определения уровня двухкомпонентного продукта в трёхфазной среде

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

Метод измерений, представленный в данной работе, позволяет решить наболевшую проблему сведения сырьевого баланса между подразделениями крупных горнообогатительных компаний, а именно, по определению расхода пульпового продукта в трёхфазной среде.

Литература

1. В. Кравченко, М. Риккен «Законодательная и прикладная метрология» № 4 23-25 (2006).
2. В.В. Кузьмин, А.А. Гайнуллина, А.Н. Ахмерова Вестник КГТУ, № 10, 289 (2013).
3. В.М. Красавин, С.В. Раинчик, В.П. Ившин, А.В. Красавин Вестник КГТУ, № 13, 193 (2013).
4. А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников, Техника защиты окружающей среды. Химия, М, 1989. 512 с.
5. Г.Н. Абрамович, В сб. «Итоги науки и техники» т.20, М.: 1986. – с.85-139.
6. Пособие по проектированию гидравлического транспорта (К СНиП 2.05.07-85). ПромтрансНИИПроект. М.: Стройиздат, 1986. – 18с.
7. Кремлёвский П.П. Расходомеры и счётчики количества. Справочник. Л.: Машиностроение. 1989г. – 701с.

© **В. Н. Петров** – к.т.н., доцент кафедры менеджмента КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, ot9vniir@yandex.ru; **С. Л. Малышев** – науч. сотр. НИО-9 ФГУП «ВНИИР», ramir.61@mail.ru; **И. А. Кирпиченков** – асп. Норильского индустриального института, kirpichenkovia@nk.nornik.ru; **И. А. Махоткин** - канд. тех. наук, доц. каф. оборудование химических заводов КНИТУ, lidanet@inbox.ru.