

УДК 622.7 (088.8)

Б. М. Мамиконян, С. Г. Кюрегян, А. С. Шахкамян

Микропроцессорный измеритель плотности и уровня пульпы

(Представлено академиком А.А. Терзяном 3/IX 2002)

Технологический процесс флотационного обогащения руд требует непрерывного контроля плотности пульпы с целью ее стабилизации.

Наиболее целесообразным является пьезометрический способ, основанный на измерении разности давлений между двумя точками контролируемой пульпы с помощью колокольных датчиков, погруженных на различные глубины [1, 2] (рис. 1). Под воздействием гидростатического давления пульповоздушной смеси в подколокольных объемах воздуха образуются избыточные давления

$$P_1 = \rho g H; \quad P_2 = \rho g (H + H_K),$$

где ρ - плотность пульпы, кг/м^3 ; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения; H - текущее значение уровня пульпы над первым колокольным датчиком, м; H_K - межколокольное фиксированное расстояние, м.

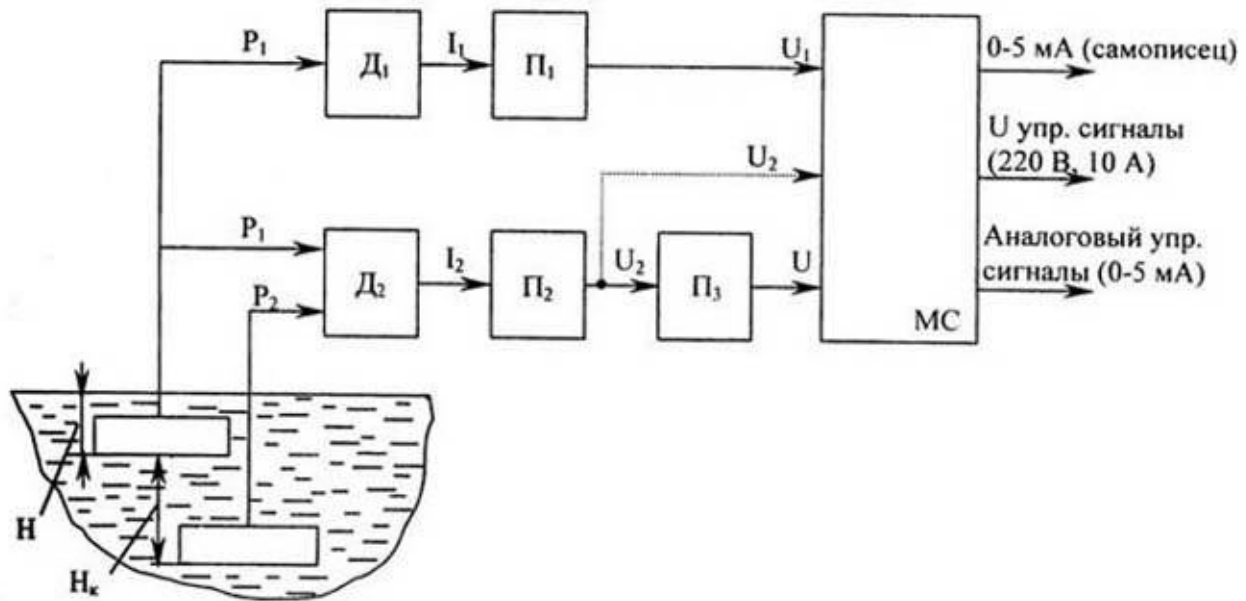


Рис. 1. Принципиальная схема измерителя

Измеряемая плотность пульпы связана с разностью давлений выражением

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g H_K.$$

Давления P_1 и ΔP преобразуются в аналоговые электрические сигналы с помощью датчиков D_1 и D_2 , в качестве которых выбраны серийно выпускаемые унифицированные полупроводниковые тензорезисторные преобразователи типа Сапфир-22М [3-5]. В технологической линии избыточное давление пульпы может достигать до 16 кПа, а разность давлений - до 3.6 кПа. Исходя из этого для измерения избыточного давления P_1 использован датчик давления типа Сапфир-22М-ДИ модели 2130, а для измерения разности давлений ΔP - дифманометр типа Сапфир-22М-ДД модели 2420. С помощью преобразователей Π_1 и Π_2 эти сигналы преобразуются в сигналы напряжения U_1 и U_2 , определяемые выражениями:

$$U_1 = K_1 \rho H, \quad U_2 = K_2 \rho, \quad (1)$$

где $K_1 = g \cdot K_{D1} \cdot R_{H1}$; $K_2 = g H_K \cdot K_{D2} \cdot R_{H2}$; K_{D1} , K_{D2} - коэффициенты преобразования датчиков D_1 и D_2 соответственно; R_{H1} , R_{H2} - нагрузочные сопротивления, подключаемые к выходам D_1 и D_2 для преобразования токового сигнала в напряжение.

Таким образом, по измеренным значениям напряжений U_1 и U_2 можно вычислить значения плотности и уровня (относительно фиксированного уровня H_K) пульпы по следующим выражениям:

$$\rho = U_2 / K_2, \quad (2)$$

$$H = U_1 K_2 / U_2 K_1. \quad (3)$$

Плотность пульпы в процессе флотации изменяется в небольших пределах, от нижнего $\rho_H = 1100 \text{ кг/м}^3$ до верхнего $\rho_B = 1600 \text{ кг/м}^3$. Поэтому для «расширения шкалы» измерения плотности «обнулим» нижний предел и будем измерять приращение плотности $\Delta \rho = \rho - \rho_H$:

$$U = K_2 K_3 \Delta \rho, \quad (4)$$

где ρ - текущее значение плотности пульпы; K_3 - коэффициент преобразования Π_3 .

Датчики Сапфир могут быть настроены на любой верхний предел измерения, не выходящий за крайние значения, предусмотренные для данной модели. С другой стороны, в технологическом процессе требуемая минимальная плотность пульпы может иметь различные значения: 1100, 1200 и 1300 кг/м^3 . Поэтому целесообразно перенастройку выходной характеристики дифференциального датчика D_2 производить схемным путем с помощью преобразователя Π_3 (рис. 1), первоначально настроив D_2 на необходимое верхнее значение $\Delta P_m = \Delta P_B$, которому будет соответствовать значение выходного тока $I_{2m} = I_{2B} = 5 \text{ мА}$.

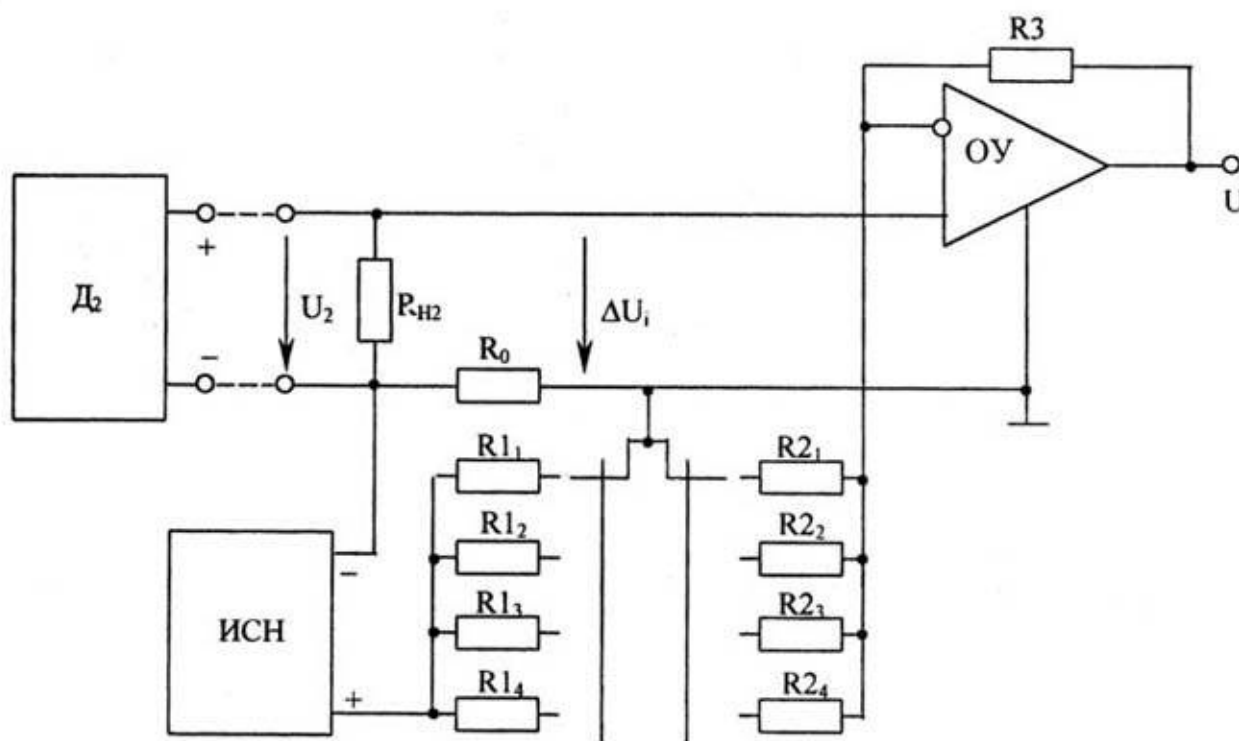


Рис. 2. Схема дополнительного преобразователя

Разработанная схема преобразователя Π_3 (рис. 2) состоит из двух узлов: узла подавления начального сигнала, соответствующего значению ρ_H , и нормирующего усилителя с настраиваемым коэффициентом усиления. Узел подавления представляет собой делитель напряжения (ДН) (сопротивление R_0 с несколькими плечами сопротивлений R_{1i}), питаемый от источника стабилизированного напряжения (ИСН). Выходной токовый сигнал I_2 датчика D_2 преобразуется в сигнал напряжения U_2 путем пропускания выходного тока через высокоточный резистор R_{H2} . Выбирая $R_{H2} = 2 \text{ кОм}$, получим $U_{2B} = I_{2B} \cdot R_{H2} = 10 \text{ В}$, что соответствует установленному верхнему значению ΔP_B (или ρ_B). Различным требуемым начальным значениям ρ_{Hi} будут соответствовать падения напряжения на резисторе R_0 , равные

$$U_{0i} = U_{2B} \rho_{Hi} / \rho_B = U_u R_0 / (R_0 + R_{1i}). \quad (5)$$

Так как напряжение U_{0i} может доходить до 8В, целесообразно выбрать сопротивление $R_0 = 10 \text{ кОм}$ и питать схему от параметрического стабилизатора. Сопротивления плеч делителя напряжения рассчитываются по формуле $R_{1i} = (U_2 / U_{0i} - 1) R_0$, где U_u - напряжение ИСН.

В схеме (рис. 2) разностный сигнал $\Delta U_i = U_2 - U_{0i}$ поступает на вход неинвертирующего усилителя. Поскольку значению максимальной плотности пульпы должен соответствовать максимальный сигнал $U_B = U_{2B} = 10 \text{ В}$ на выходе усилителя, то для нормирования выходного сигнала усилителя сигнал ΔU_i необходимо усиливать с различными коэффициентами усиления K_i

в зависимости от значений ρ_{Hi} . Значения этих коэффициентов должны удовлетворять условию $U_B = K_{3i}(U_{2B} - U_{0i})$, следовательно, с учетом (5), получим

$$K_{3i} = U_{2B}/(U_{2B} - U_{0i}) = \rho_B/(\rho_B - \rho_{Hi}).$$

Усилитель разностного сигнала построен на прецизионном ОУ типа К140УД27А. Сопротивления резисторов обратной связи вычисляются по известной формуле

$$R_{2i} = R_3/(K_i - 1).$$

Коэффициенты K_1 , K_2 в выражениях (1) и $K_i = K_2 K_{3i}$ в выражении (4) можно вычислить также исходя из предельного значения напряжения $U = U_B = 10$ В при $\rho = \rho_B$:

$$K_1 = 10/\rho_B H_m; K_2 = 10/\rho_B; K_i = 10/(\rho_B - \rho_{Hi}),$$

где H_m - максимальный уровень пульпы над первым колокольным датчиком.

Сигналы U_1 , U_2 и U поступают на вход АЦП микропроцессорной системы (МС) для преобразования в кодовые эквиваленты, обработки информации, формирования, усиления и выдачи управляющих сигналов. С помощью полученных формул (2) - (4) МС производит (по установленной программе) расчет уровня и плотности пульпы с частотой 1 Гц. МС построена на базе микропроцессорного набора КР580 и представляет собой программируемый узел с ПЗУ и ОЗУ с объемами памяти 8 и 2 Кб соответственно. МС выдает также токовый сигнал, пропорциональный разности давлений, для управления исполнительными механизмами системы регулирования плотности пульпы.

Оценим погрешности измерения уровня и плотности пульпы.

Номинальную функцию преобразования значения плотности пульпы получим из (2):

$$\rho = U_2/gH_K K_{D2} R_{H2} \quad (6)$$

Источниками инструментальной погрешности при определении значения плотности пульпы по (6) являются погрешности измерения напряжения U_2 , установки уровня H_K , погрешности дифференциального датчика давления D_2 и сопротивления R_{H2} :

$$\delta(\rho) = \delta(U_2) - \delta(H_K) - \delta(D_2) - \delta(R_{H2}) + \delta(N),$$

где $\delta(\bullet)$ - относительные значения перечисленных погрешностей, $\delta(N)$ - относительное значение погрешности вычисления и округления результата.

Распространяя относительные погрешности $\delta(i)$ на множество реализаций и учитывая статистическую независимость составляющих погрешностей, определим математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) относительных погрешностей:

$$m(\rho) = m(U_2) - m(H_K) - m(D_2) - m(R_{H2}) + m(N),$$

$$\sigma(\rho) = \sqrt{\sigma^2(U_2) + \sigma^2(H_K) + \sigma^2(D_2) + \sigma^2(R_{H2}) + \sigma^2(N)},$$

где $m(i)$, $\sigma(i)$ - МО и СКО относительных погрешностей соответственно.

Оценка погрешности измерения результата зависит от способа нормирования метрологических характеристик применяемых средств измерений (СИ).

Если удастся исключить систематическую составляющую погрешности результата, например, калибровкой прибора, то инструментальную погрешность измерения плотности пульпы можно оценить в виде предела допускаемой относительной погрешности (ГОСТ 8.009-84):

$$\delta\rho_\partial = \pm k_\rho \sigma(\rho), \quad (7)$$

где k_ρ - доверительный коэффициент композиции СКО $\sigma(\rho)$, зависящий от закона распределения композиции и значения доверительной вероятности.

Чаще всего метрологические характеристики промышленных СИ нормируют традиционно в виде пределов относительных или абсолютных погрешностей. Если есть основания полагать, что допускаемая погрешность разных экземпляров СИ данного типа может принимать любое значение в пределах допуска с равной вероятностью, то допускаемую погрешность измерения плотности пульпы описанным способом (с учетом равномерного закона распределения пределов допускаемых погрешностей, $k_{СИ} = 1,73$) можно оценить с доверительной вероятностью 0.95 согласно (7) по следующему выражению:

$$\delta\rho_\partial = \pm 1,13 \sqrt{\delta U_\partial^2 + \delta H_{K\partial}^2 + \delta D_{2\partial}^2 + \delta R_\partial^2 + \delta N_\partial^2}, \quad (8)$$

где δU_∂ , $\delta H_{K\partial}$, $\delta D_{2\partial}$, δR_∂ , δN_∂ - пределы допускаемых относительных погрешностей СИ напряжения, уровня, давления, сопротивления и вычисления и округления результата; $k_\rho = 1.96/1.73 = 1.13$ в предположении, что композиция из множества составляющих с равномерным законом распределения ($k_{\rho 2} = 1.73$) имеет закон, близкий к нормальному ($k_{\rho 1} = 1.96$).

Номинальную функцию преобразования приращения плотности получим из (2) и (5): $\Delta\rho = (U_2 - U_{0i})/K_2 K_{3i}$. Поскольку при значениях плотности, близких к нижнему пределу, значение $\Delta\rho$ приближается к нулю, то вместо относительной введем приведенную погрешность измерения приращения плотности в виде $\Delta(\Delta\rho)/\rho_H$, где $\Delta(\Delta\rho)$ - абсолютная погрешность измерения приращения плотности. Композиция СКО приведенной погрешности измерения приращения плотности будет определяться в соответствии с номинальной функцией преобразования следующим образом:

$$\sigma(\Delta\rho) = \sqrt{[\sigma^2(K_2) + \sigma^2(K_{3i})]\Delta\rho^2/\rho_{Hi}^2 + [U_2^2\sigma^2(U_2) + U_{0i}^2\sigma^2(U_{0i})]/\rho_{Hi}^2 K_2^2 K_{3i}^2 + \sigma^2(N)},$$

где $\sigma^2(U_{0i}) = \sigma^2(U_{II}) + [\sigma^2(R_0) + \sigma^2(R_{1i})]R_{1i}^2/(R_0 + R_{1i})^2$; $\sigma(K_2)$, $\sigma(K_{3i})$, $\sigma(U_{II})$, $\sigma(R_0)$, $\sigma(R_{1i})$ - СКО относительных погрешностей соответственно преобразования плотности в напряжение, преобразователя Π_3 , ИСН, номиналов сопротивлений R_0 и R_{1i} . Переходя к пределам допускаемых погрешностей применяемых СИ, полагая одинаковыми погрешности измерений напряжений и классы номиналов сопротивлений, а также принимая во внимание (1), (5) и (8), определим оценку допускаемой относительной погрешности измерения приращения плотности аналогично (8):

$$\delta\Delta\rho = \pm 1,13 \cdot$$

$$\sqrt{\left(\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_{Hi}}\right)^2 (\delta H_K^2 + \delta D_2^2 + \delta K_3^2) + \frac{\rho^2 + \rho_{Hi}^2}{\rho_{Hi}^2 K_{3i}^2} \delta U^2 + \left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_{Hi}}\right)^2 + \frac{2R_{1i}^2}{(R_0 + R_{1i})^2 K_{3i}^2}\right] \delta R^2 + \delta N^2}\right)} \quad (9)$$

Оценка допускаемой относительной погрешности измерения уровня пульпы по формуле

$$H = \frac{K_{D2} U_1 R_{H2}}{K_{D1} U_2 R_{H1}} H_K$$

производится аналогичным образом. В результате получается

$$\delta H = \pm 1,13 \sqrt{2\delta U^2 + \delta H_K^2 + \delta D_1^2 + \delta D_2^2 + 2\delta R^2 + \delta N^2}. \quad (10)$$

Для расчета погрешностей (8) и (9) необходимо иметь значения входящих в них пределов допускаемых погрешностей. Напряжения U_1 и U_2 можно измерять с погрешностью $\delta U_0 = 0.1\%$. Предел допускаемой основной погрешности дифманометра класса точности 0.2 определяется по формуле [5] $\delta D_{20} = 0,2\Delta P_B/\Delta P$, откуда для верхнего предела $\Delta P_B = 4$ кПа и текущего значения разности давлений $\Delta P = 2.4$ кПа (для требуемых пределов $\rho_H = 1.2 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_B = 1.6 \cdot 10^3$ кг/м³ при $H_K = 0.2$ м), получим: $\delta D_{20} = 0.34\%$. Измерение межколокольного расстояния можно произвести с абсолютной погрешностью не более ± 1 мм, поэтому при $H_K = 0.2$ м погрешность

$\delta N_{K\partial}$ составит не более 0.5%. Применяя в качестве R_H прецизионный резистор типа С2-29В, можно принять $\delta R_{\partial} \leq 0.1\%$. Примем $\delta N_{\partial} = 0.1\%$.

С учетом определенных пределов допускаемых относительных погрешностей СИ получим: $\delta \rho = 0.71\%$, $\delta \Delta \rho = 1.95\%$ (для наихудшего случая, когда $\rho = \rho_B$ и $\Delta \rho = \rho_B - \rho_{H1}$), $\delta H = 0.95\%$.

Погрешность измерения приращения плотности $\Delta \rho = U/g N_K K_3 K_{D2} R_{H2}$ в отличие от погрешности (8) дополнительно содержит погрешность $\delta \Pi_3 \approx 0.1\%$ преобразования Π_3 и составляет $\delta \Delta \rho_{\partial} = 0.72\%$.

Выше была рассмотрена основная погрешность, которая нормируется для нормальных условий эксплуатации. В реальных условиях эксплуатации в преобразователях дифференциального давления типа Сапфир 22М-ДД возникают дополнительные погрешности главным образом от изменения температуры окружающей среды и избыточного давления.

Дополнительная температурная погрешность преобразователя модели 2420 класса точности 0.2, выраженная в процентах от верхнего предела измерения, на каждые 10°C изменения температуры окружающей среды не превышает значения [5] $\gamma(t) = 0.7 \cdot 0.2 + 0.3 \cdot 0.2 P_B/P_{BH}$, где $P_B = 4$ кПа - максимальный верхний предел измерений данной модели; P_{BH} - настраиваемый верхний предел измерений, который в рассматриваемом случае составляет от 2.3 до 3.1 кПа (в зависимости от ρ_B).

Подставляя значение $P_{BH} = 2.3$ кПа (наихудший случай), получим $\gamma(t) = 0.24\%/10^\circ\text{C}$.

Дополнительная погрешность преобразователя, вызванная изменением избыточного давления в пределах $\pm P_{IB}$ (где $P_{IB} = 4$ МПа - предельно допустимое избыточное давление для модели 2420), не должна превышать [5] $\gamma(p) = \pm 0.2 P_B/P_{HB} \approx \pm 0.35\%$.

Тогда предел допускаемой относительной погрешности измерения плотности пульпы в рабочих условиях можно вычислить по формуле

$$\delta \rho_{\partial} = \pm 1.13 \sqrt{\delta U_{\partial}^2 + \delta N_{K\partial}^2 + \delta D_{2\partial}^2 + \delta R_{\partial}^2 + \gamma^2(t) + \gamma^2(p) + \delta N_{\partial}^2} = 0.86\%.$$

Аналогично получаем для $\delta \Delta \rho = 2.00\%$.

Для исключения систематической составляющей погрешности при измерении плотности способом (2) можно провести калибровку системы измерения. Для этого необходимо создать пульпу с различными, но близкими к среднему значениям плотности и измерять соответствующие этим значениям напряжения U_2 с высокой точностью ($\pm 0.1\%$) цифровым вольтметром. Для повышения точности измерения ρ целесообразно провести многократные измерения и в качестве действительного значения взять среднее арифметическое значение: $\rho_{cp} = M/nV$, где M - суммарная масса отобранной пульпы, кг; V - объем мерного сосуда, м^3 ; n - частота измерений.

Учитывая, что закон распределения композиции из двух составляющих с равномерным законом распределения является трапецеидальным, вычислим допускаемую относительную погрешность

измерения $\rho_{\text{ср}}$ с доверительной вероятностью 0.95 для $\delta M_{\partial} = 0.1\%$ и $\delta V_{\partial} = 0.2\%$ по выражению $\delta \rho_{\text{ср},\partial} = 1.03 \sqrt{\delta M_{\partial}^2 + \delta V_{\partial}^2} = 0.23\%$. Это означает, что калибровку исследуемого измерительного устройства предлагаемым способом можно проводить с неисключенной случайной составляющей систематической погрешности, допускаемый предел которой равен 0.23%.

Государственный инженерный университет Армении

Литература

1. *Козин В. З., Троп А. Е., Комаров А. Я.* Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках. Учебник для вузов. М. Недра. 1980. 336 с.
2. Микропроцессорный локальный регулятор-датчик уровня пульпы МИЛОР - Д/УП2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации К003.000.000.ТО. АН СССР, Центр автоматизации процессов управления в народном хозяйстве. Капанское научно-производственное отделение. Капан. 1998. 40 с.
3. *Иордан Г. Г., Юровский А. Я.* - АКТА ИМЕКО. 1982. С.115-124.
4. Преобразователь измерительный Сапфир-22. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 08919030 ТО. М. ВНИИПМ. 1988. 114 с.
5. *Иордан Г. Г., Юровский А. Я., Смирновский А. Г., Сердюков В. И.* - Приборы и системы управления. 1990. N11. С. 27-30.

Բ.Մ. Մամիկոնյան, Ս.Գ. Կյուրեղյան, Ա.Ս. Շադգամյան

Խյուսի խտության և մակարդակի միկրոպրոցեստրային չափիչ

Մշակված միկրոպրոցեստրային չափիչը նախատեսված է հանքանյութի հարստացման տեխնոլոգիական գործընթացում խյուսի խտությունը և մակարդակը անընդհատ հսկելու համար: Չափիչում օգտագործված է խտության չափման պիեզոմետրական եղանակը, որը հիմնված է հսկվող խյուսի տարբեր բարձրություններ ունեցող երկու կետերում ճնշումները չափելու և դրանց տարբերության միջոցով խտությունը որոշելու վրա: միաժամանակ որոշվում է նաև խյուսի մակարդակը: Չափվող ճնշումները կերպավորվում են էլեկտրական ազդանշանի՝ տվիչ-դիֆմանոմետրի միջոցով:

Բերված է չափիչի տարրերի ընտրության և հաշվարկի մեթոդիկան, ներկայացված են չափաբանական բնութագրերի հետազոտության տեսությունը և արդյունքները: