

ОБ ОДНОЙ ПОМЕХЕ В СИСТЕМАХ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Е. С. Кричевский, С. С. Галушкин

В создании высокочастотных систем непрерывного контроля влажности наиболее трудоемки эффективные и надежные в эксплуатации датчики. Датчики влажности обычно контактируют с сыпучим материалом или находятся в непосредственной близости от него, подвергаясь вибрациям, температурным воздействиям, истиранию, воздействию окружающей среды (сырости, запыленности, химической активности), т. е. мешающих факторов, искажающих информацию.

При высокочастотном контроле влажности наиболее целесообразны емкостные датчики с односторонним рассеянным полем. Плоские датчики одностороннего поля («скользящие лыжи») свободны от ряда мешающих факторов и могут успешно применяться для контроля влажности сыпучего материала, движущегося на ленте [1]. При отсутствии в цепи транспортирования сыпучего материала конвейерных установок такие датчики устанавливаются в перегруженных точках. Иногда вместо них используют датчики шинкового типа. Однако в процессе эксплуатации непрерывных высокочастотных влагометрических систем обнаружено налипание сыпучего материала на рабочие поверхности датчиков, что существенно искажало информацию о контролируемом параметре. Систематическая чистка рабочих поверхностей датчиков усложняет эксплуатацию влагометрических систем. Исследование природы налипания и эффективные средства борьбы с ним и являются предметом предлагаемой статьи.

Рассмотрим природу налипания влажных сыпучих материалов на твердые поверхности и возможные методы борьбы с этой помехой непрерывному контролю влажности. В процессе налипания действуют силы следующего происхождения: молекулярного, электростатического, капиллярного.

Предположим, частицы мелкодисперсного материала имеют сферическую форму. Сила тяжести, действующая на сферическую частицу, как известно, изменяется пропорционально кубу ее радиуса, а сила молекулярного характера пропорциональна радиусу в первой степени. Следовательно, для частиц малых размеров при прочих равных условиях сила прилипания при уменьшении размера частиц убывает медленнее, чем сила тяжести. В результате у частиц мелкодисперсного материала сила прилипания молекулярной природы превосходит силу тяжести.

Б. В. Дерягин [2] получил выражение силы прилипания молекулярной природы для частиц со сферической поверхностью

$$N_0 = 2\pi R f(0), \quad (1)$$

где R — радиус частицы; $f(0) = \delta_{12} - \delta_{13} - \delta_{23}$, соответственно, поверхностные натяжения на границах фаз: 1 — частица, 2 — плоскость, 3 — окружающая среда.

При контакте между частицами электризующихся мелкодисперсных сыпучих материалов и твердыми поверхностями могут возникать дополнительные электростатические силы прилипания. Однако при высокочастотном контроле влажности сыпучий материал находится в переменном электрическом поле, что исключает возможность возникновения сил прилипания электростатического характера. Экстремальные значения сил прилипания молекулярного и электростатического характера определяли экспериментально методом центрифугирования [3]. Сила прилипания

$$N_n = \left(1 + \frac{Rn^2}{900}\right) G, \quad (2)$$

где R — радиус барабана центрифуги; n — число оборотов центрифуги в 1 мин.; G — вес частицы.

Сила прилипания в $13 \div 32$ раза больше силы тяжести частицы и при сухих материалах (например, апатитовом или железном концентрате) значительно меньше, чем при увлажненных [3].

Максимальное удельное давление прилипания частиц сыпучего материала на твердую поверхность молекулярной q_m и электростатической q_e природы для сухих мелкодисперсных материалов

$$q_{\max} = q_m + q_e \cong 1,6 \text{ г/см}^2.$$

При высокочастотном контроле влажности эта величина будет еще меньше, поскольку отсутствует составляющая электростатического характера. Однако удельное давление прилипания, развивающееся при контакте увлажненных материалов с твердыми поверхностями, оказывается во много раз больше и может достигать

$$q'_{\max} = 75 \text{ г/см}^2.$$

Это свидетельствует о том, что на границе частица — поверхность возникают силы прилипания иного характера. При определенных условиях влага в местах контакта частиц друг с другом и с твердой поверхностью может формироваться в виде манжет, имеющих при смачиваемых сыпучих материалах и твердых поверхностях вогнутый мениск. Следовательно, давление внутри манжеты меньше давления в окружающей среде, поэтому и происходит прилипание частицы к поверхности (рис. 1).

Давление внутри манжеты по формуле Лапласа

$$p_m = \sigma \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right), \quad (3)$$

где σ — поверхностное натяжение на границе воздух — вода; r_1 и r_2 — главные радиусы кривизны манжеты.

Сила взаимодействия частицы с плоскостью

$$F = p_m S_m = \sigma X_m, \quad (4)$$

где S_m — площадь манжеты; X_m — периметр манжеты.

Таким образом, при появлении в мелкодисперсных материалах влаги создаются условия для возникновения капиллярных сил, которые в случае смачиваемых твердых тел приводят к образованию сил прилипания. Величины p_m , S_m , X_m можно выразить через радиус частицы и некоторый

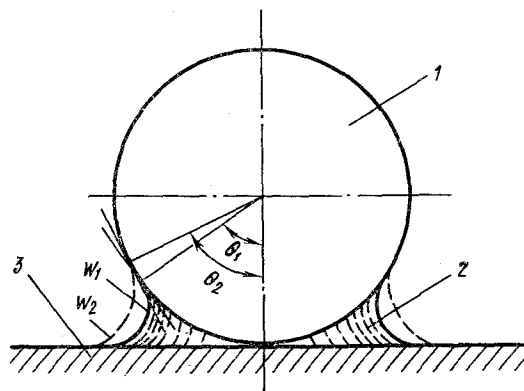


Рис. 1. Образование манжеты в процессе прилипания:
1 — частица сыпучего материала; 2 — водяной манжет;
3 — твердая поверхность

полярный угол θ (см. рис. 1), зависящий от влажности ($\theta = KW$), так как с изменением влажности сыпучего материала размеры манжет изменяются. Выражение (4) можно привести к виду

$$F = 2\pi R\sigma (2 - \tg \theta/2). \quad (5)$$

По мере высыхания сыпучего материала угол θ в выражении (5) стремится к нулю, соответственно сила прилипания стремится к наибольшему значению

$$F_{\max} = 4\pi R\sigma.$$

Относя $F_{\max}$ к площади сечения частицы, получим величину удельного давления, прижимающую частицу материала к твердой поверхности,

$$q_{\max} = \frac{4\pi R\sigma}{\pi R^2} = 4 \frac{\sigma}{R}. \quad (6)$$

Установив природу сил прилипания, перейдем к количественной их оценке. Пусть реальный мелкодисперсный материал состоит из частиц сферической поверхности, уложенных определенным образом на плоскости. С помощью такой модели проследим поведение влаги при заполнении и опорожнении пор. Для этого необходимо знать диаметр частиц модели и коэффициент пористости. Диаметр сферических частиц модели сыпучего материала определяется среднераспределенным размером частиц реального материала на основании гранулометрической характеристики

$$d_m = d_1x_1 + d_2x_2 + \dots + d_nx_n, \quad (7)$$

где x — содержание фракции в составе навески (безразмерная величина); d — диаметр частиц фракции в составе навески; n — число фракций гранулометрического анализа.

Укладывать частицы модели следует так, чтобы пористость модели была близка пористости реального сыпучего материала. Коэффициент пористости

$$K_{\pi} = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{пор}} + V_{\text{ТВ}}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{пор}}$ — объем пор в навеске; $V_{\text{ТВ}}$ — объем твердого в навеске.

Поскольку удельный объем частиц материала

$$V_{\text{ТВ}} = \frac{1}{\gamma_{\text{ТВ}}},$$

а объем (удельный) пор

$$V_{\text{пор}} = \frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_{\text{ТВ}}},$$

то

$$K_{\pi} = 1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_{\text{ТВ}}}, \quad (9)$$

γ_0 и $\gamma_{\text{ТВ}}$ — объемный и удельный вес материала соответственно.

Для апатитового и железнорудного концентратов пористость близка к пористости модели с кубической укладкой. Следовательно, расчетные значения для модели будут приемлемы для реального материала.

Влажность ячеек модели характеризуется величиной объемной влажности

$$W_V = \frac{V_{\text{В}}}{V_{\text{В}} + V_{\text{ТВ}}}, \quad (10)$$

где $V_{\text{В}}$ — объем влаги в порах.

Объем влаги, отнесенный к единичной частице при кубической укладке,

$$V_{\text{В}} = V_{\text{м. ч}} + V_{\text{м. п}}, \quad (11)$$

где $V_{\text{м. ч}}$ — объем манжет между частицами, $V_{\text{м. п}}$ — объем манжет между частицами и плоскостью,

$$V_{\text{м. ч}} = 2\pi R^3 \left\{ (\sec \theta - 1)^2 \left[1 - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \operatorname{tg} \theta \right] \right\} = 2\pi R^3 A; \quad (12)$$

$$V_{\text{м. п}} = \pi R^3 (1 - \cos \theta)^2 \left(\frac{1 + 2 \cos \theta}{3} \right) = \pi R^3 B. \quad (13)$$

Практически можно считать, что все манжеты одинаковы и одинаково изменяются при увеличении влажности модели. Следовательно, при $0 < \theta < \theta_{\text{кр}}$ манжеты существуют дискретно, а при $\theta \geq \theta_{\text{кр}}$ сольются ($\theta_{\text{кр}}$ — критический полярный угол, при котором манжеты сливаются в единый объем). Накладываем еще одно условие: пусть капиллярное давление определяется манжетами между частицей и плоскостью. Тогда в рассматриваемом диапазоне влажности и определенном θ ($0 < \theta < \theta_{\text{кр}}$), в соответствии с формулами (12) и (13), для любого заданного значения объемной влажности можно определить величину капиллярного давления

$$P = \frac{\sigma^2 (1 - \operatorname{tg} \theta/2)}{R \operatorname{tg}^2 \theta/2 (2 - \operatorname{tg} \theta/2)}. \quad (14)$$

Зависимость $P(W)$ (рис. 2) характеризуется наличием трех специфических областей: 1) AB — область существования дискретных менисков, характерная резким уменьшением капиллярного давления с изменением влажности, так как с ростом влажности сыпучего материала увеличиваются размеры менисков, уменьшается кривизна их менисков, а следовательно, уменьшается капиллярное давление; 2) BC — область, в которой капиллярное давление остается постоянным, так как все дискретные мениски сомкнулись; 3) CD — область, в которой модель полностью насыщается влагой и капиллярное давление стремится к нулю.

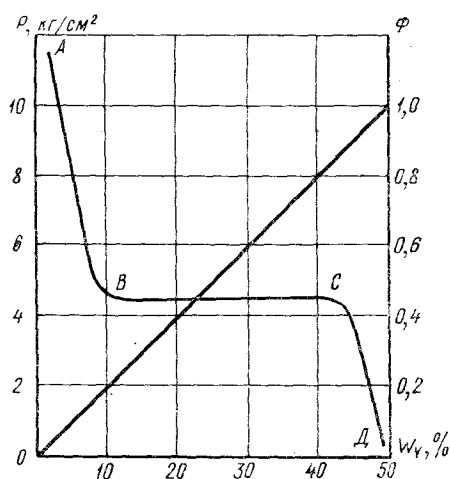


Рис. 2. Зависимость давления налипания и количества воды в сечении пограничного слоя от влажности материала

Чтобы рассчитать силу прилипания капиллярной природы, необходимо оценить изменение площади, занимаемой влагой на твердой поверхности, и суммарный периметр менисков в зависимости от влажности пограничного слоя [4]. Суммарная площадь, занимаемая влагой на твердой поверхности, будет складываться из ряда площадей, занятых влагой в зонах сплошного заполнения и в местах образования отдельных менисков

$$S = \sum S_c + \sum S_0, \quad (15)$$

где $\sum S_c$ и $\sum S_0$ — суммарная площадь соответственно зон сплошного заполнения и отдельных менисков.

Практически зависимость величины площади, занимаемой влагой, от весовой влажности дисперсного материала можно представить в виде некоторой линейной функции, предполагая, что закон изменения количества влаги в рассматриваемом сечении пограничного слоя идентичен закону изменения количества влаги в объеме материала

$$\Phi = \frac{W_x}{W_n}, \quad (16)$$

где W_x — рассматриваемая влажность; W_n — влажность полного насыщения пограничного слоя.

Как видно из рис. 2, величина Φ может меняться от 0 до 1. Любое ее значение в этом диапазоне дает величину смоченной площади для заданного значения влажности. Располагая зависимостями $P(W)$ и $\Phi(W)$, можно вести расчет, определив величину удельной силы прилипания капиллярного характера

$$q_1 = P\Phi. \quad (17)$$

Для расчета полной силы прилипания, кроме составляющей q_1 , следует учесть составляющую от действия поверхностного натяжения σ , приложенного к периметру смоченной площади,

$$X = \sum X_c + \sum X_0, \quad (18)$$

где ΣX_c и ΣX_0 — суммарная величина периметра соответственно зон сплошного заполнения и отдельных манжет. При этом ΣX_0 всегда $\gg \Sigma X_c$.

С увеличением влажности по мере слияния отдельных манжет и образования зон сплошного заполнения величина X начнет уменьшаться и достигнет при обводнении пограничного слоя нулевого значения. Так как рост смоченной площади оценивается введенной ранее функцией Φ , то изменение величины общего периметра по мере увеличения влажности можно определить, введя функцию $\Phi' = (1 - \Phi)$. Тогда, полагая в первом приближении $\Sigma X_c = 0$, при монодисперсной среде, которой является принятая модель, получим зависимость величины общего периметра от влажности пограничного слоя

$$X = (1 - \Phi) \Sigma X_0, \quad (19)$$

$$\Sigma X_0 = X_1 m, \quad (20)$$

где m — число частиц в пограничном слое, зависящее от вида укладки; X_1 — периметр единичной манжеты,

$$X_1 = 2\pi RC, \quad (21)$$

C — некоторая тригонометрическая функция, зависящая от влажности,

$$C = \operatorname{tg} \theta/2 (2 - \operatorname{tg} \theta/2). \quad (22)$$

Подставив выражение (20) в формулу (19) и отнеся эту величину к единице площади, получим для кубической укладки модели удельную величину, составляющую силу прилипания,

$$q_2 = \frac{\sigma}{R} \cdot \frac{\pi}{2} C (1 - \Phi). \quad (23)$$

Суммарную величину изменения удельной силы прилипания капиллярной природы составит сумма выражений (17) и (23). Теоретические зависимости для расчета суммарных сил прилипания, полученные для модели, целиком справедливы только при контакте строго однородных дисперсных материалов с твердыми поверхностями. Для полидисперсных материалов следует использовать зависимости, основанные на экспериментальной характеристике сыпучего материала $P(W)$. Такая характеристика снимается известным способом, основанным на изменении гидростатического давления или разряжения свободной воды [3]. Технические трудности при снятии зависимости $P(W)$ не возникают. Для апатитового концентрата $q_2 \approx 100$ г/см², что существенно превосходит значения сил прилипания прочего характера. Так как суммарная площадь электродов датчика «двойная лыжа», внедренного на фабрике АНОФ-2 комбината «Апатит», равна 100 см², общая сила прилипания составляет примерно 10 кг.

Сила трения, а следовательно, сила, прилагаемая к наливному материалу в плоскости скольжения датчика по поверхности движущегося потока материала, в расчете на площадь электродов примерно равна 1—2 кг при оптимальном весе датчика. Следовательно, наливиный материал будет надежно удерживаться на рабочей поверхности датчика, внося значительную помеху в работу влагометрической системы в целом. На основе изложенного можно сделать следующее заключение: 1) основными силами, вызывающими прилипание сыпучего материала к твердым поверхностям датчиков непрерывных влагометрических систем, являются

силы капиллярного происхождения; 2) силы прилипания капиллярного происхождения, возникающие в плоскости соприкосновения частиц сыпучего материала с поверхностью датчика, возникают и развиваются при наличии влаги в этой плоскости — приэлектродном слое; 3) силы прилипания капиллярного происхождения в приэлектродном слое возникают при условии гидрофильности поверхности частиц сыпучего материала или рабочей поверхности датчика.

Следовательно, предотвратить возникновение сил налипания капиллярного характера может поддержание приэлектродного слоя материала постоянно сухим или гидрофобизация сыпучего материала либо рабочей поверхности датчика.

Металлическая поверхность высокочастотных влагометрических датчиков гидрофильна и покрывать ее гидрофобным материалом нежелательно, так как такие материалы, как правило, являются диэлектриками и снижают чувствительность датчика. Кроме того, датчик постоянно скользит по поверхности сыпучего материала, и гидрофобное покрытие будет быстро истираться. Гидрофобизация поверхности частиц сыпучего материала не предусматривается техническими условиями. Поэтому единственно приемлемым мероприятием в борьбе с налипанием влажного мелкодисперсного материала на рабочие поверхности датчиков является предотвращение увлажнения приэлектродного слоя.

Рассмотрим наиболее неблагоприятный для возникновения налипания случай. Пусть объемная влажность сыпучего материала недостаточна для того, чтобы в момент соприкосновения образовались водные манжеты между частицами сыпучего материала и рабочей поверхностью датчика. Пусть также температура сыпучего материала будет выше температуры датчика (например, в горнообогатительном производстве).

Несмотря на незначительную влажность сыпучего материала в целом, как показали эксперименты, приэлектродный слой оказывался более увлажненным. Влажность его достаточна для возникновения сил прилипания. Единственной причиной увлажнения приэлектродного слоя в данном случае является термовлагоперенос из материала, температура которого выше окружающей среды, к поверхности датчика с температурой окружающей среды. Это легко подтверждается выражением, описывающим термодиффузию пара в капиллярнопористом теле [6]

$$q_w = 25Z \frac{dx}{dt}, \quad (24)$$

где Z — некоторая функция переменной температуры; $\frac{dx}{dt}$ — градиент (перепад) температур сыпучего материала и окружающей среды (датчика). Отсюда видно, что поток влаги q_w через некоторую плоскость, проведенную в материале параллельно плоскости датчика, прямо пропорционален величине и знаку градиента температур.

Следовательно, для предотвращения увлажнения приэлектродного слоя одним из очевидных мероприятий будет сведение до нулевого или отрицательного значения величины градиента температур. Это можно осуществить теплоизоляцией или подогревом тела датчика.

При непрерывном контроле влажности рассматриваемые датчики полностью теплоизолировать невозможно. Теплоизоляция эффективна в борьбе с налипанием в комбинации с подогревом твердой поверхности, с которой контактирует сыпучий материал [5]. Следовательно, единственным средством борьбы с налипанием является подогрев тела датчика. В соответствии с выражением (24), необходимо создавать градиент тем-

ператур такой величины и знака, чтобы поток влаги был направлен из приэлектродного слоя в сторону сыпучего материала.

В цехах горнообогатительных предприятий сыпучий материал, идущий из сушильных барабанов, имеет температуру до $90-100^{\circ}\text{C}$. Температура окружающего воздуха в помещении, где установлены поточно-транспортные механизмы и датчики влагометрических систем, может быть от -10 до -30°C .

Следовательно, в первый момент, когда датчик опускается на сыпучий материал, его температура ниже температуры материала. Под действием перепада температур, который может достигать 110°C , пары влаги устремляются из толщи сыпучего материала к поверхности датчика и конденсируются на ней. В результате приэлектродный слой существенно увлажняется (несмотря на незначительную влажность сыпучего материала), возникает сила прилипания капиллярного происхождения. В процес-

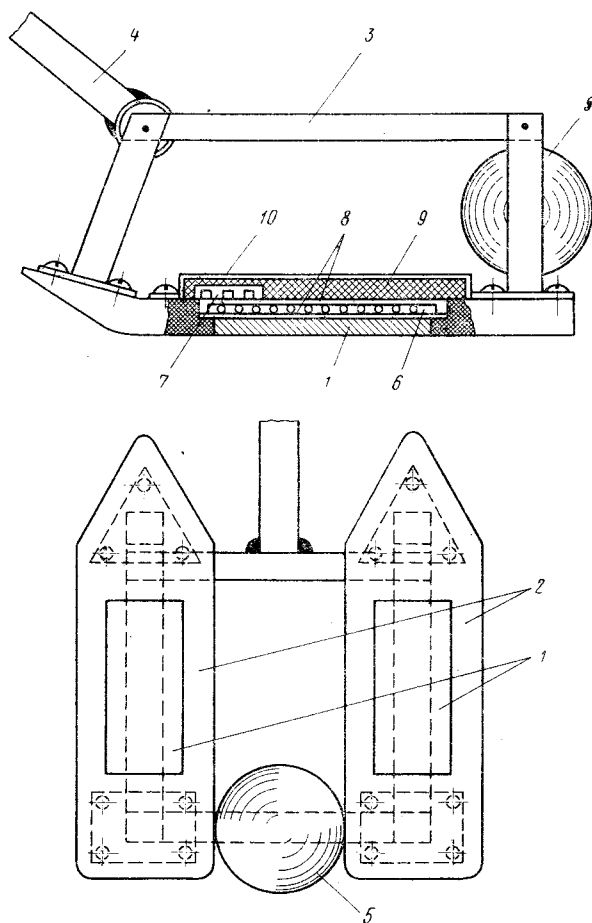


Рис. 3. Конструкция датчика, свободной от налипания (внедрена на фабрике АНОФ-2 комбината «Апатит»):

1 — электроды датчика; 2 — фторопластовые лыжи; 3 — связывающая рама; 4 — рычаг; 5 — уплотняющий груз; 6 — спираль нагревателя; 7 — электрические контакты; 8 — асбестовые прокладки; 9 — изоляционные прокладки; 10 — экранирующие коробки

се работы тело датчика прогревается и начинается отсос влаги из приэлектродного слоя в глубь сыпучего материала. Число налипших на поверхность датчика частиц сыпучего материала возрастает в результате увеличения силы прилипания капиллярной природы [см. формулу (5)]. Действительно, при снижении влаги уменьшается полярный угол θ , и сила прилипания стремится к своему максимальному значению.

В процессе эксплуатации датчиков скользящего типа на горнообогатительных предприятиях установлено, что оптимальное соотношение температур, обеспечивающее благоприятный тепловой режим датчика, т. е. гарантирующее отсутствие налипания,

$$t_{\text{датчика}} = t_{\text{мах. мат}} + 50^{\circ}\text{C}, \quad (25)$$

где $t_{\text{датчика}}$ — температура нагрева датчика; $t_{\text{мах. мат}}$ — максимально возможная температура сыпучего материала; 50°C — избыточная температура, которая выбирается с учетом колебаний температуры окружающей среды и создания некоторого отрицательного перепада температур между сыпучим материалом и телом датчика для гарантированной работы без налипания во всех возможных производственных ситуациях.

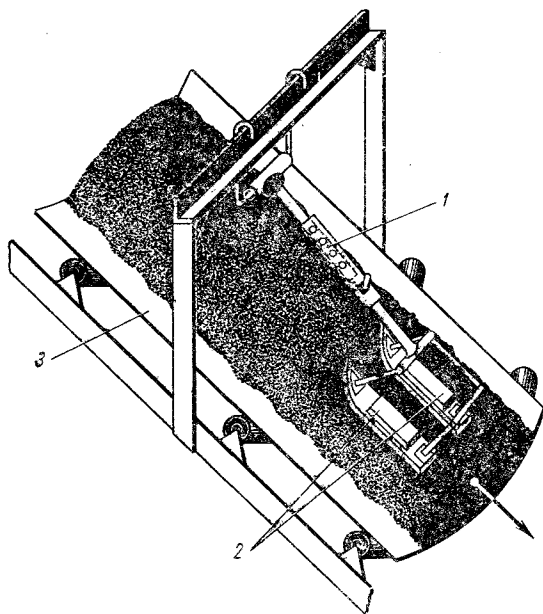


Рис. 4. Общий вид установки «пара лыж»:
1 — рычаг; 2 — датчик; 3 — конвейер

Как видно из рис. 3, 4, такой датчик состоит из связанных между собой лыж. В каждую лыжу, изготовленную из диэлектрика, вмонтированы заподлицо с рабочей поверхностью металлические электроды, к которым через специальные разъемы подведен высокочастотный кабель. Сверху на электроды уложены спирали электрического нагревателя, изолированные асбестовыми прокладками и заключенные в металлические коробки для экранирования и защиты от механических повреждений.

Емкостные датчики одностороннего рассеянного поля могут иметь и другие конструкции: датчики с плоскими кольцевыми электродами,

устанавливаемые неподвижно в перегруженных течках, датчики шнекового типа и др. Например, датчики типа «одинарная лыжа» удобны на конвейерных линиях малой производительности. В этом случае техника подогрева тела датчика также не вызывает трудностей и проблема борьбы с налипанием может быть решена аналогично изложенной.

Выводы

1. При непрерывном контроле влажности налипание мелкодисперсного сыпучего материала на рабочие поверхности датчиков — следствие действия сил капиллярной, молекулярной и электростатической природы.

2. Уровень влияния сил капиллярной природы выше, чем молекулярной и электростатической (например, для апатитового концентрата 100 г/см^2 и $1,6 \text{ г/см}^2$ соответственно).

3. Борьба с налипанием материала должна быть направлена, в первую очередь, по пути предотвращения развития сил капиллярной природы. Для датчиков непрерывных влагометрических систем наиболее приемлем метод, основанный на подогреве тела датчика.

4. Установлена надежность в эксплуатации непрерывных влагометрических систем с датчиками типа «пара лыж» и «одинарная лыжа».

5. При подогреве соответствующих узлов датчиков шнекового типа или неподвижных, устанавливаемых в перегруженных течках, явление налипания также устраняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кричевский Е. С. Теоретические основы и анализ систем высокочастотного контроля влажности при обогащении полезных ископаемых. Автореф. докт. дисс., ЛГИ, 1968.

2. Дерягин Б. В. Исследования по внешнему трению и прилипанию. Теория прилипания. ЖФХ, 1935, т. 6, вып. 10.

3. Мацкевич М. К. Налипание порошковых грузов на твердые поверхности. Судостроение, 1967.

4. Байбаков А. З. Физическое взаимодействие почвы с металлическими поверхностями при обработке. Автореф. канд. диссерт. Агрофизич. ин-т, 1965.

5. Резников В. Б., Глобус А. М. Оценка некоторых теплоизоляционных методов борьбы с налипанием транспортируемого апатита. Тр. Союзморниипроект, 1965, вып. 7.

6. Philip J. de Vries D. Trans Amer. geophys. Union, 1957, V. 38.

