

К ВОПРОСУ ОСАЖДЕНИЯ ТВЁРДЫХ ЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ

Р. В. Галич*, инженер;

А. Р. Якуба**, д-р техн. наук, профессор;

В. И. Склабинский***, д-р техн. наук, профессор;

В. Я. Стороженко***, канд. техн. наук, профессор.

* Частное акционерное общество «Северодонецкий «ОРГХИМ»,
Гвардейский проспект, 32, г. Северо-донецк, Луганская обл., 93409,
Украина;

** Сумский национальный аграрный университет,
ул. Кирова, 160, г. Сумы, 40021, Украина;

*** Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина

Результаты анализа известных способов взаимодействия твёрдых частиц с жидкостной плёнкой при мокром пылеулавливании дают возможность прогнозировать перспективность использования предлагаемого способа, который заключается в дополнительном сообщении частицам вращательного движения вокруг собственной оси.

Ключевые слова: пылеулавливание, твёрдые частицы, плёнка жидкости, погружение, вихревой аппарат, вращательное движение.

Проблемы повышения эффективности работы сухих центробежных пылеуловителей, в частности циклонов и вихревых аппаратов со встречными закрученными потоками (ВАВЗП) [1], общеизвестны, и в настоящее время привлекают внимание многих исследователей, предлагающих новые технические решения.

Среди множества направлений конструктивного совершенствования вихревых пылеуловителей одним из перспективных является так называемая модульная модернизация, которая заключается в установке дополнительных устройств, обеспечивающих доулавливание мелкодисперсных фракций пыли после основного аппарата, например с применением мокрого способа очистки [2, 3].

К известным способам взаимодействия между твёрдыми частицами и жидкостью (механизмам осаждения) относятся: гравитационный, инерционный, зацепления, ударный, ударно-инерционный, под действием центробежных сил и другие [4, 5]. В современных конструкциях мокрых пылеуловителей улавливание пылевых частиц осуществляется под воздействием нескольких механизмов осаждения одновременно, но всегда можно выделить превалирующий принцип, который собственно и определяет концепцию пылеуловителя.

Эффективность очистки запылённых потоков от взвесей в современных пылеулавливающих устройствах зависит от многих факторов: гидродинамики аппарата (производительности, количества взаимодействующих потоков, их скоростей и направления, способа взаимодействия твёрдой и жидкой фаз); характеристики твёрдой (дисперсности, плотности, формы и концентрации частиц, их адгезионно-когезионных свойств и др.), и жидкой фаз (вида: плёнка, капли, пена; поверхностного натяжения, скорости и направления движения) [5].

Известен способ сепарации твёрдых частиц из запылённых потоков, сутью которого заключается во взаимодействии поступательно движущейся твёрдой частицы, находящейся в газовом потоке, с неподвижным или движущимся слоем жидкости. В движущемся

скоростном потоке газа твёрдой частице сообщается кинетическая энергия, которую она расходует на преодоление сил сопротивления плёнки жидкой фазы. При этом если частица пыли имеет сферическую форму, то она считается уловленной [5], когда погружается в жидкость выше своего миделевого сечения, и уносится с отходящим газовым потоком, когда обладает энергией, недостаточной для погружения под уровень жидкости.

Известно, что для элемента, находящегося на границе любого тела, симметрия в распределении молекулярных сил нарушается, что приводит к образованию свободной энергии поверхности [5]. Другим следствием этого является возникновение равнодействующей молекулярных сил, направленной внутрь тела, которая втягивает молекулы, расположенные у поверхности тела, внутрь его, и тем самым уменьшает его поверхность до минимума. Так, при отсутствии внешних сил жидкость всегда стремится принять форму сферы, характеризуемой минимальной поверхностью и максимальной поверхностной энергией системы. Свободная поверхность жидкости подобна мягкой плёнке, удерживаемой бесчисленным множеством упругих нитей, направленных внутрь неё. Плёнка действует на тела, с которыми она соприкасается, с определённой силой, которая обуславливает сокращение поверхности жидкости и называется поверхностным натяжением. Эта сила проявляется только на разграничивающих (межфазных) поверхностях, направлена тангенциально к поверхности жидкости и представляет собой отношение усилия, с которым поверхностная плёнка действует на ограничивающий её контур, к длине этого контура. В случае однокомпонентной жидкости эта сила численно равна энергии и соответственно работе, необходимой для дробления жидкости.

На рисунке 1 схематично показан механизм взаимодействия твёрдой частицы прямоугольного поперечного сечения с жидкостной плёнкой [5].

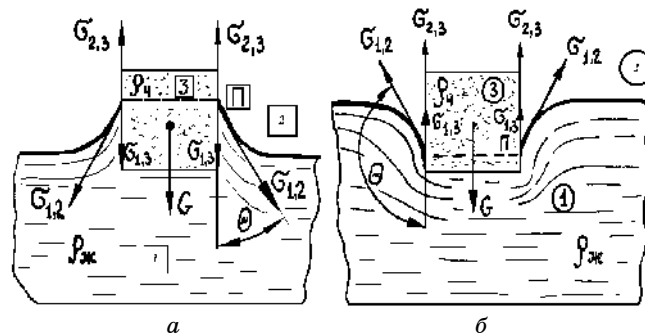


Рисунок 1 – Механизм взаимодействия пылевой частицы с жидкостью:
а – смачиваемая частица; б – несмачиваемая частица

Периметр смачивания частиц (линия П) является границей взаимодействия трёх сред – жидкости 1, воздуха 2 и твёрдого тела 3. Эти среды имеют разграничивающие их поверхности:

- поверхность «жидкость-воздух» с поверхностным натяжением $1,2$;
- поверхность «воздух-твёрдое тело» с поверхностным натяжением $2,3$;
- поверхность «жидкость-твёрдое тело» с поверхностным натяжением $1,3$.

Сопротивление, оказываемое движущейся твёрдой частице при непосредственном контакте с жидкостью на границе раздела фаз, обусловлено, прежде всего, силами поверхностного натяжения, имеющими место в мономолекулярном слое за счёт сил

межмолекулярного сцепления. Под этим монослоем, то есть в объёме свободной жидкости, эти силы в значительной мере уравновешены, и дальнейшему погружению твёрдой частицы вглубь плёнки жидкости они практически не оказывают существенного сопротивления.

Согласно [5], на единице длины периметра смачивания твёрдой частицы действуют три силы, направленные касательно к соответствующей поверхности раздела и перпендикулярно к периметру смачивания: силы $F_{1,3}$ и $F_{2,3}$ действуют в плоскости поверхности твёрдого тела, а сила $F_{1,2}$ направлена под некоторым углом Θ , называемым углом смачивания, или краевым углом. Если пренебречь силой тяжести частицы и подъёмной силой вытесненной ею жидкости, то при образовании равновесного угла Θ все три силы должны уравновешиваться.

Условие равновесия сил выражается уравнением Юнга:

$$F_{2,3} = F_{1,3} + F_{1,2} \cos \Theta, \quad (1)$$

откуда следует, что

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (2)$$

$\cos \Theta$ может меняться от +1 до -1, а угол Θ – от 0 до 180°. Значения $\Theta > 90^\circ$ соответствуют случаю, когда частицы смачиваются плохо. Полного несмачивания частиц ($\Theta = 180^\circ$) практически не наблюдается, так как между жидкостью и твёрдым телом всегда действуют силы взаимного притяжения.

К смачиваемым телам относятся например, стекло, кварц, кальцит ($\Theta = 0^\circ$). У пирита $\Theta = 30^\circ$, графита $\Theta = 60^\circ$, талька $\Theta = 70^\circ$, серы $\Theta = 80^\circ$. Примером материала с плохой смачиваемостью может служить парафин ($\Theta = 105^\circ$).

Смачивающиеся (гидрофильные) пылевые частицы втягиваются в воду силой поверхностного натяжения, действующей на границе раздела фаз. Если плотность материала твёрдой частицы выше плотности жидкости, к «силе втягивания» добавляется сила тяжести и частица погружается в жидкость. Если плотность материала частицы меньше плотности поглощающей жидкости, то вертикальная составляющая сил поверхностного натяжения уменьшается на подъёмную силу жидкости (Архимедову силу), а их соотношение определяет поведение частицы.

Несмачивающиеся (гидрофобные) частицы поддерживаются на поверхности воды силами поверхностного натяжения, вертикальная составляющая которых прибавляется к подъёмной силе (рис. 1 б). Если сумма этих сил превышает силу тяжести, то частица остаётся на поверхности жидкости.

Если $\Theta > 90^\circ$, то частица сферической формы всплывает настолько, что её экватор (миделево сечение) располагается выше уровня воды. С уменьшением размеров сферических частиц величина силы тяжести уменьшается пропорционально кубу радиуса, а вертикальная составляющая сил поверхностного натяжения – пропорционально его первой степени. Вследствие этого определённые фракции мелкодисперсных гидрофобных пылей обязательно будут оставаться на поверхности воды – плавать.

Следует отметить, что гидрофобной часто становится пыль гидрофильных материалов вследствие образования на поверхности частиц электрического заряда, одноимённого с зарядом на поверхности жидкости потенциала, а также вследствие адсорбции на поверхности пылинок прочного слоя молекул воздуха, препятствующих их смачиванию.

Практикой установлено, что способность твёрдых тел к смачиваемости уменьшается с увеличением степени их измельчения (дисперсности), причём даже такой предельно гидрофильный материал, как кварц, после тонкого измельчения становится трудносмачиваемым. Можно считать установленным фактом, что частицы размером меньше 10 мкм, особенно меньше 5 мкм, относятся к несмачиваемым независимо от их природы и состава [5].

Если жидкость плохо смачивает частицу, что чаще всего имеет место в практике, поверхность жидкости вблизи твёрдой частицы приобретает вогнутую форму и силы поверхностного натяжения препятствуют погружению в неё частицы.

Способность тонкодисперсной пыли смачиваться оказывает существенное влияние на эффективность её улавливания. Для улавливания гидрофобных частиц обязательно условие, чтобы кинетическая энергия, сообщённая частице потоком, превышала работу погружения её в жидкость, то есть работу преодоления сил поверхностного натяжения. Это условие может быть выполнено только при больших скоростях соударения. В противном случае при столкновении частицы, например, с каплей жидкости, она не проникает в неё, а упруго отскакивает или же остаётся на её поверхности благодаря адгезионным силам. В результате с течением времени поверхность жидкостной плёнки или капли покрывается сплошным слоем, препятствующим дальнейшему захвату пылевых частиц из очищаемого потока. Аналогичное скопление частиц наблюдается и на поверхности плёнок в мокрых пылеуловителях. При прочих равных условиях эффективность улавливания гидрофобных частиц тем выше, чем больше скорость отсепарированных частиц из несущего воздушного потока в момент их контактирования с поверхностью раздела фаз. Эта скорость, как правило, пропорциональна кинетической энергии газового потока. В связи с этим, увеличение общих энергетических затрат на очистку запылённых потоков в рационально сконструированных мокрых пылеуловителях, как правило, ведёт к повышению эффективности пылеулавливания.

Таким образом, можно считать, что основным препятствием для погружения частицы, достигшей поверхности жидкости, и обладающей определённой кинетической энергией, является противодействие со стороны сил поверхностного натяжения слоя жидкости на границе раздела фаз.

Рассмотрим механизм взаимодействия поступательно движущейся несмачивающейся частицы сферической формы в момент её сближения с горизонтальной поверхностью жидкости, показанный на рисунке 2.

Направление движения частицы x составляет угол α с нормалью к поверхности жидкости z . Условно принято полное несмачивание ($\theta = 180^\circ$). Силы поверхностного натяжения, действующие на границе «жидкость-воздух», в данном случае (точка C), составляют прямой угол с радиусом частицы в точках касания поверхностной плёнки, расположенных на окружности периметра диаметром $2r$, и направлены по общей касательной к поверхности жидкости в точках касания и к поверхности частицы в тех же точках. Так как силы поверхностного натяжения действуют по всей границе контакта между жидкостью и частицей, то суммарная выталкивающая сила составит:

$$F = 2\pi\lambda\sigma \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \beta\right) = -2\pi\lambda\sigma \sin(\alpha + \beta). \quad (3)$$

Исходя из условия равенства кинетической энергии движущейся частицы работе погружения её в жидкость на глубину $z=2r$, можно определить предельную скорость, при которой достигается надёжное

удержание частиц, например в плёнках масляных фильтров. Энергия погружения частицы в жидкость определяется интегралом

$$E_{\sigma} = \int_0^{Z=2r} F dZ. \quad (4)$$

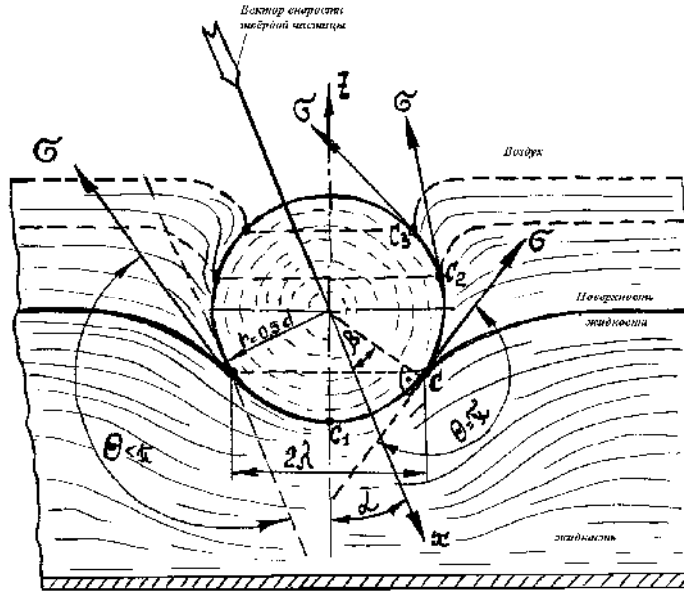


Рисунок 2 – Схема осаждения сферической частицы на поверхность жидкости

Из рисунка 2 имеем $\lambda = r \sin(\alpha + \beta)$ и $F = -2\pi r \sigma \sin^2(\alpha + \beta)$.

Путь погружения частицы по нормали к поверхности:

$$Z = r - r \cos(\alpha + \beta).$$

Величина Z изменяется в пределах $0 \leq Z \leq 2r$. Тогда $dZ = r \sin(\alpha + \beta) d(\alpha + \beta)$. Точка C перемещается из положения C_1 в момент соприкосновения частицы с поверхностью жидкости ($Z=0$) через точку C_2 до крайнего её положения C_3 , соответствующего полному погружению частицы ($Z=2r$), причём угол α изменяется в пределах $(\alpha - \beta)$.

Величину энергии погружения твёрдой частицы, входящей в плёнку жидкости под углом α , можно определить из выражения

$$E_x = \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{r^2 \sigma}{\cos^2 \alpha}. \quad (5)$$

Предельное условие погружения частицы имеет вид

$$mw^2/2 = E_{\sigma},$$

откуда

$$W = \frac{1}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho \cdot d}}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что при любых размерах и плотности материала несмачивающихся частиц существуют такие значения угла вхождения (атаки) α , при которых погружение и, следовательно, надёжное улавливание частицы может произойти только при очень больших скоростях движения. Очевидно, что на практике в подавляющем большинстве случаев частицы пыли, достигающие поверхности жидкости под большим углом вхождения, упруго рикошетируют от её свободной поверхности, причём в зависимости от соотношения между величинами W и α они отражаются либо круто вверх, после чего вновь разгоняются и уносятся отходящим воздушным потоком (явление вторичного уноса), либо движутся полого над поверхностью жидкости, совершая прыгающие движения. В последнем случае возможно повторение рикошетов до тех пор, пока траектория прыгающих частиц не изменится таким образом, что угол α станет достаточно малым для выполнения предельного условия с учётом установившейся скорости сближения частицы с поверхностью плёнки жидкости. При $\alpha = 0$, то есть, когда частица движется перпендикулярно поверхности жидкости, получим выражение [5]:

$$W = 2,83 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \cdot d}}, \text{ м/с.} \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что при скорости фильтрации около 3 м/с, характерной например для масляных фильтров, в них могут надёжно улавливаться несмачивающиеся частицы сферической формы, начиная с размера $d_{\text{ч}} = 10 \text{ мкм}$ и далее в сторону их укрупнения. Частицы, не погружившиеся полностью в плёнку в момент удара, остаются на её поверхности, которая быстро выпрямляется до формы, определяемой только весом частицы (в случае горизонтальной поверхности плёнки). То есть, частицы с медианным размером меньше 10 мкм будут плохо улавливаться фильтром, а частицы менее 5 мкм и вовсе будут уноситься с очищенным потоком. Адгезия в данном случае определяется только молекулярными силами и для частиц крупнее 1 мкм, согласно изложенному выше, очень мала, вследствие чего осевшие частицы легко могут быть сорваны и унесены воздушным потоком.

В действительности угол смачивания $\alpha < \alpha_0$, поэтому выталкивающая сила F несколько меньше теоретической и может быть определена из выражения

$$F = 2\pi\lambda\sigma \sin(\alpha + \beta) \cos \Theta, \text{ Н.} \quad (8)$$

Здесь λ – коэффициент трения (принимается в расчётах $\lambda = 0,005$).
Кинетическая энергия погружения частицы под слой жидкости

$$E_{\sigma} = -\frac{8}{3} \pi \cdot r^2 \cdot \sigma \frac{\cos \Theta}{\cos^2 \alpha}. \quad (9)$$

При $\alpha = \alpha_0$ энергия погружения определяется формулой (9), при $\Theta = \pi/2$ $E = 0$, так как вектор силы поверхностного натяжения направлен вдоль поверхности жидкости. $0 < \alpha < \pi/2$ способствуют поглощению частицы жидкостью.

Если толщина жидкостной плёнки больше размера твёрдой частицы, то последняя может погрузиться в жидкость целиком. Утолщённые плёнки и слои жидкости необходимы для надёжного улавливания частиц при повышенных концентрациях частиц в запылённом потоке, особенно при наличии в нём крупных частиц. Такие условия создаются при очистке воздушных выбросов в мокрых плёночных пылеуловителях, при этом для поглощения частиц, как правило, используют воду.

В рассматриваемом случае кинетическая энергия движущейся частицы должна быть достаточной для преодоления сопротивления жидкости при ударе о её поверхность и при погружении в неё. Важно выяснить также, какова должна быть минимальная толщина слоя жидкости, чтобы крупная частица, движущаяся в нём с большой скоростью, не смогла вновь вернуться в воздушный поток, отразившись от твёрдой стенки вследствие упругого удара. Во всяком случае, для предотвращения явления отскока рекомендуется, чтобы толщина плёнки жидкости была в 20 раз больше диаметра самой крупной частицы, находящейся в очищаемом потоке.

Таким образом, проведенный анализ условий осаждения пылевых частиц на поверхности жидкости позволяет сделать следующие выводы:

- в устройствах с поверхностями, смоченными маслами (фильтрах), могут надёжно улавливаться хорошо смачивающиеся частицы размером в диапазоне 20-50 мкм и плохо смачивающиеся частицы размером более 10 мкм;

- плёнками воды в мокрых пылеуловителях достаточно надёжно улавливаются частицы, движение которых характеризуется величиной критерия Рейнольдса $Re > 5$ [5];

- частицы малых размеров (менее 10 мкм) и частицы, соударяющиеся с поверхностью плёнки жидкости с малыми скоростями, погружаются в жидкость на глубину менее величины d ; если частицы достигают поверхности контакта под большими углами вхождения (при $\alpha > 45^\circ$), они способны к рикошетированию, и если они плохо смачиваются жидкостью, то могут быть вынесены воздушным потоком;

- для повышения эффективности сепарации частиц следует стремиться к уменьшению поверхностного натяжения жидкости путём модификации жидкой фазы (введения так называемых смачивателей – поверхностно-активных веществ (СПАВ) преимущественно синтетического происхождения: олеат натрия, сульфанол, синтанол и др.;

- практикой установлено, что способность твёрдых тел к смачиванию уменьшается с увеличением их дисперсности. Считается, что частицы с медианным размером меньше 10 мкм, особенно меньше 5 мкм, относятся к несмачиваемым независимо от их природы и состава [5]. Лучшему смачиванию частиц способствует также повышение температуры поглощающей жидкости, так как при этом, с одной стороны, уменьшаются силы поверхностного натяжения, а с другой – разрушается слой воздуха, адсорбированного на поверхности частиц из атмосферы.

В качестве примера рассмотрим пирометаллургический процесс восстановительной плавки шихты с использованием в качестве восстановителя угля, подаваемого в циклонно-вихревую камеру в измельчённом виде [12]. В рабочей зоне циклонно-вихревой камеры стекающий вниз плав формирует закрученный поток, несущий частицы диспергированного угля. Контактная зона образована внутренней поверхностью камеры.

Если представить механизм силового взаимодействия между твёрдой частицей угля и плёнкой плава в момент сепарации частицы из закрученного потока, когда последняя потеряла скорость на поверхности расплава, то можно установить ряд факторов, определяющих условия реагирования одиночной частицы в пристенной области циклонной камеры.

Схема взаимодействия частицы с плёнкой плава представлена на рис. 3.

Под действием центробежной силы твёрдая частица, двигаясь в радиальном направлении к стекающей по вертикальной плоскости плёнке жидкости (плава), достигает её поверхности и взаимодействует с поверхностным слоем. В момент контакта движущаяся частица массой m

обладает определённой кинетической энергией, величина которой в первом приближении может быть определена из выражения:

$$A_1' = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{2}{3} \pi \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot r_{\text{ч}}^3 \cdot v^2, \quad (10)$$

где m – масса частицы, кг; v – линейная скорость частицы при контакте с поверхностью расплава, м/с; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы, кг/м³; $r_{\text{ч}}$ – радиус твёрдой частицы, м.

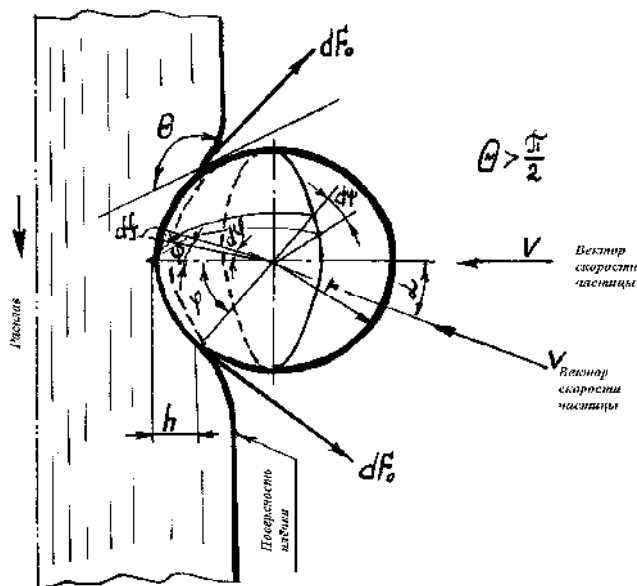


Рисунок 3 – Схема механизма взаимодействия твёрдой частицы со свободно стекающей плёнкой плава в пристенной зоне

При движении частицы угля с определённой скоростью v перпендикулярно поверхности расплава ($\theta = 0$) в момент её контакта с плёнкой вся кинетическая энергия A_1' удара расходуется на преодоление сил поверхностного натяжения и погружение под слой жидкости. При вхождении же частицы под некоторым углом к поверхности плёнки ($\theta > 0$) часть энергии, расходуемой на проникновение в жидкость, может быть рассчитана по формуле:

$$A_1 = \frac{2}{3} \pi \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot r_{\text{ч}}^3 \cdot v^2 \sin \alpha, \quad (11)$$

где α – угол между направлением вектора скорости частицы и перпендикуляром к поверхности жидкости (угол вхождения частицы).

При этом на преодоление вязкостных сил плава расходуется энергия, рассчитываемая по выражению:

$$A_2 = 3\pi \cdot \mu \cdot r_{\text{ч}} \cdot v \cdot h, \quad (12)$$

где μ – вязкость жидкой плёнки (расплава), Па·с; h – глубина проникновения частицы в слой расплава, м.

На преодоление сил поверхностного натяжения затрачивается энергия:

$$A_3 = 4\pi r_{\text{ч}}^2 \sigma \cdot \cos(\pi - \Theta), \quad (13)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения плёнки плава, Н·м, Θ – угол смачиваемости твёрдой частицы (сферической формы) плавом, град.

В общем случае можно записать следующие неравенства:

$$A_1 > A_2 + A_3; \quad A_1 < A_2 + A_3. \quad (14)$$

В зависимости от знака неравенства между левой и правой частями выражения результат взаимодействия твёрдой частицы с жидкостной плёнкой может быть различным.

В том случае, когда $A_1 > A_2 + A_3$, то есть, энергия проникновения частицы внутрь плава превышает сопротивление поверхностных и вязкостных сил, то частицу считают надёжно уловленной.

Если неравенство имеет вид $A_1 < A_2 + A_3$, то следует вывод: энергии для проникновения в расплав явно недостаточно и, следовательно, частица может либо отразиться от плёнки и вновь вернуться в газовый поток, то есть фактически не будет отделённой от потока воздуха, либо частично погрузиться в расплав на глубину $h < 2r_v (A_1 \approx A_2 + A_3)$. При этом в зависимости от существующих в рабочей камере гидродинамических условий, частица может считаться уловленной, когда адгезионные силы расплава притягивают и удерживают частицу на поверхности, то есть поверхность частицы хорошо смачивается, либо быть унесённой – при отсутствии смачивания.

В случае, когда вектор скорости частицы нормален поверхности плёнки ($\alpha = \pi/2$), а глубина погружения сферической формы частицы достигает своего минимума (экваториального) сечения ($h = r_v$), из неравенства (14) для конкретных условий процесса можно рассчитать необходимые размер частицы и её радиальную составляющую для выполнения условия её полного погружения в жидкость.

Выражение в этом случае принимает вид:

$$r = \frac{9\mu \cdot V_R + 6\sigma \cdot \cos(\pi - \Theta)}{\rho_v \cdot V_R^2}, \text{ м.} \quad (15)$$

Задаваясь радиальной скоростью входа твёрдой частицы в плёнку жидкости, можно определить её геометрические размеры в зависимости от внешних условий.

Рассмотренные выше механизмы взаимодействия частиц пыли (способы осаждения частиц на поверхность жидкости) реализуются практически во всех известных конструкциях пылеуловителей мокрого типа, например в мокрых газопромывателях разных типов и высокоскоростных скрубберах Вентури [4, 6].

Известен способ улавливания твёрдых частиц, распределённых в движущемся газовом потоке, с диспергированной в этом потоке (капельной) жидкостью (полые газопромыватели) [4–10].

Известен способ улавливания твёрдых частиц, распределённых в газовом потоке, смоченной поверхностью инертных тел (пылеулавливание на смоченных поверхностях инертных тел) [4].

Известен также способ улавливания твёрдых частиц, распределённых в газовом потоке, с жидкостью в виде пены, при этом взаимодействие между пылевыми частицами и жидкостью происходит внутри газовых пузырьков, образующихся способом барботажа (пенный режим) [5, 6].

В основе перечисленных выше способов пылеулавливания фактически лежит принцип динамического (ударного) взаимодействия движущейся прямолинейно или по криволинейным траекториям твёрдой частицы с движущимся или неподвижным препятствием в виде мономолекулярного пограничного слоя жидкости, обладающим определённой величины сопротивлением, обусловленным поверхностным натяжением.

В плане аппаратного оформления способ центробежной сепарации твёрдых частиц с использованием жидкостной плёнки реализуется в

центробежных пылеуловителей мокрого типа (циклонах и вихревых аппаратах).

Если в центробежных пылеуловителях сухого типа отделившаяся в сепарационной камере пыль ссыпается вдоль стенки вниз и скапливается в бункерной части, то в аппаратах мокрого типа процесс сепарации заканчивается при контакте частиц со смачивающей жидкостью, свободно стекающей по стенкам сепарационной камеры. Эффективность мокрого пылеулавливания при этом может быть гораздо выше, чем в аппаратах сухого типа, при одном условии – непрерывном обновлении контактной поверхности. В противном случае зеркало жидкости покрывается сплошным монослоем уловленных, но не полностью погружённых частиц, экранирующих поверхность контакта от твёрдой фазы, непрерывно поступающей из закрученного потока газозвеси, что приводит к снижению общей улавливающей способности. В пылеуловителях данного типа соблюдение условия восстановления зеркала улавливающей поверхности достигается подачей жидкости извне, равномерным распределением её по внутренней поверхности сепарационной камеры, непрерывным отводом загрязнённой жидкости из аппарата на регенерацию или технологическую переработку. Удельный расход жидкости (воды, раствора) при этом достигает $0,0025 \text{ м}^3$ на 1 м^3 очищаемого воздуха, что является вполне достаточным для эффективной работы мокрого пылеуловителя.

Наиболее простым и широко распространённым техническим устройством для мокрого пылеулавливания является центробежный скруббер [5, 9], или циклон с водяной плёнкой, схема которого показана на рисунке 4.

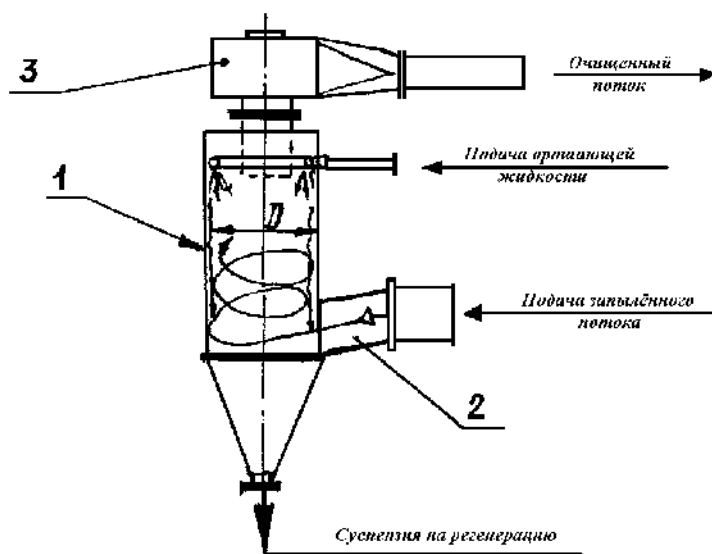


Рисунок 4 – Схема центробежного скруббера с водяной плёнкой:
1 – камера сепарационная; 2 – тангенциальный завихритель;
3 – улитка раскручивающая

Аппарат работает следующим образом. Запылённый воздух подаётся в нижнюю часть цилиндрического корпуса тангенциально, очищенный – отводится из аппарата через раскручивающую улитку 3, установленную на выходном патрубке. Внутренняя поверхность сепарационной камеры 1 покрывается жидкостью из системы орошения, снабжённой форсунками грубого распыла. Крупные пылевые частицы под воздействием центробежных сил движутся в радиальном направлении и достигают

стенок смоченной поверхности непосредственно за входом запылённого потока на первом же витке восходящей спирали. В зависимости от размера и скорости, частицы либо погружаются в жидкостную плёнку (улавливаются) и отводятся с жидкостью через нижний штуцер на регенерацию, либо, преодолев сопротивление пограничного слоя жидкости, упруго отражаются от стенки и вновь возвращаются в восходящий вихревой воздушный поток. Наряду с крупными частицами пыли в сепарационной зоне достаточно эффективно улавливаются и мелкие фракции из слоёв течения, достаточно близко расположенных к стенке. Вступают в контакт с водой и улавливаются также плохо смачиваемые частицы, в том числе и с размером менее 5 мкм, если в момент контакта центробежное движение их в воздухе характеризуется числом Рейнольдса $Re > 5$. В противном случае частицы недостаточно погружаются в плёнку жидкости и могут быть сорваны с её поверхности и унесены восходящим потоком воздуха. Несмачивающиеся частицы пыли ($d_p < 3 \text{ мкм}$) вследствие их более пологой траектории сближения со стенкой сепарационной камеры входят в контакт со стекающей по её винтовой поверхности плёнкой под очень большим углом вхождения, недостаточным для преодоления сопротивления, рикошетируют и уносятся из аппарата с очищенным воздухом.

Условия улавливания частиц, вступающих в контакт с плёнкой жидкости за пределами начального участка своего движения, менее благоприятны. Радиальная составляющая скорости даже относительно крупных частиц в момент их взаимодействия с жидкостной плёнкой может быть меньше, чем это необходимо для полного их погружения в плёнку, то есть торможение вращения закрученного потока по высоте сепарационной камеры центробежного скруббера (циклона) способствует вторичному уносу мельчайших частиц пыли и приводят к снижению общей эффективности пылеулавливания.

С увеличением входной скорости очищаемого потока эффективность работы аппарата повышается за счёт интенсификации крутки и, как следствие, возрастания центробежных сил, действующих на частицы пыли. Однако с увеличением пропускной способности по очищаемому воздуху резко возрастают и гидравлические потери, значительно интенсифицируется брызгоунос, нарушается гидродинамика закрученных потоков в рабочей камере. Поэтому расчётную входную скорость потока принимают не более 20-23 м/с, а среднюю скорость в поперечном сечении сепарационной зоны («плановую» скорость) – $V_a = 4,5 \dots 5,5 \text{ м/с}$.

Отмеченные выше недостатки центробежных скрубберов (циклонов) с водяной плёнкой в значительно меньшей мере проявляются в вихревых аппаратах со встречными закрученными потоками (ВАЗЗП), работающих в качестве мокрых пылеуловителей. В этих аппаратах благодаря взаимодействию встречно направленных и закрученных в одну сторону потоков параметр крутки результирующего потока (интенсивность вращения) по всей высоте сепарационной зоны практически постоянный, как и величина центробежных сил. Поэтому эффективность сепарации частиц в ВАВЗП значительно выше по сравнению с циклонами. Кроме того, при относительно небольших гидравлических потерях (до 2000 Па) «плановая» (отнесённая к поперечному сечению сепарационной камеры) скорость может быть увеличена до $V_a = 8 \dots 10 \text{ м/с}$, что позволяет значительно увеличить пропускную способность аппарата по очищаемому воздуху с одновременным увеличением улавливающей способности и гидравлических потерь.

В качестве примера рассмотрим устройство и работу роторно-вихревого пылеуловителя (рис. 5) на базе ВАВЗП [11], в котором повышение эффективности пылеулавливания достигается за счёт интенсификации сепарационного процесса в рабочей камере.

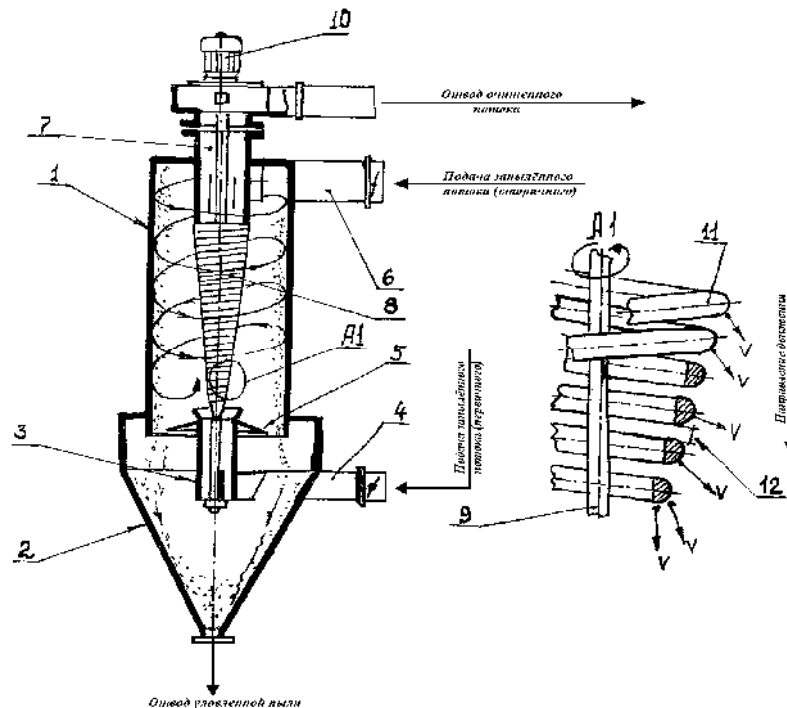


Рисунок 5 – Схема роторно-вихревого пылеуловителя со встречными закрученными потоками: 1 – корпус; 2 – бункер пылесборный; 3 – аксиальный завихритель; 4 – ввод первичного потока; 5 – шайба отбойная; 6 – ввод вторичного потока; 7 – выходной патрубок; 8 – экран роторный; 9 – вал; 10 – привод; 11 – спираль винтовая; 12 – зазор межвитковый

Газовзвесь с подлежащей сепарации полидисперсной пылью поступает в цилиндрический корпус 1, являющийся сепарационной камерой, двумя потоками: по вводу первичного потока 4 через аксиальный завихритель 3, а также по тангенциальному вводу вторичного потока 6. При взаимодействии встречно направленных и закрученных в одну сторону вращающихся потоков образуется результирующий вихревой поток, из которого пылевые частицы под воздействием центробежных сил сепарируются на стенки корпуса 1 и далее транспортируются в пылесборный бункер 2. Результирующий поток, в котором скапливаются частицы в виде тонкодисперсных фракций, не отделённых в сепарационной камере, разворачивается и направляется вверх к выходному патрубку 7, попадая при этом под воздействие роторного экрана 8, который представляет собой проницаемый для газа спиральный элемент 11 в виде конической пружины. Экран приводится во вращение от электродвигателя 10 и вращается в ту же сторону, что и результирующий вихревой поток, который проходит через зазоры в приосевую часть сепарационной камеры. Благодаря ударному воздействию витков экрана на частицы пыли при их столкновении, последние упруго отражаются в радиальном направлении от оси к стенке в область действия центробежных сил потенциального потока, и благодаря этому в значительной мере снижается вторичный вынос как крупнодисперсных, так и среднедисперсных фракций пыли в выходной патрубке 7. Кроме того, наличие вращающегося и проницаемого для газа роторного экрана способствует стабилизации гидродинамической обстановки по всей высоте сепарационной камеры пылеуловителя за счёт

более равномерного распределения радиального стока результирующего потока по всей высоте корпуса.

В рассмотренном вихревом пылеуловителе с достаточно высокой эффективностью могут быть реализованы как сухой, так и мокрый способы очистки запылённого воздуха. Для осуществления последнего достаточно лишь известными способами обеспечить номинальные гидродинамические условия для сепарации частиц, подачу поглощающей жидкости в виде устойчивой плёнки по всей высоте сепарационной камеры.

Сравнительная оценка фракционной эффективности улавливания частиц кварцевой пыли разного диаметра (3, 5, 8 и 12 мкм) при наличии и отсутствии вращающегося защитного экрана показана на рисунке 6. Опыты проводились на модели цилиндрического вихревого аппарата ВЗП с диаметром сепарационной камеры 145 мм и высотой 290 мм.

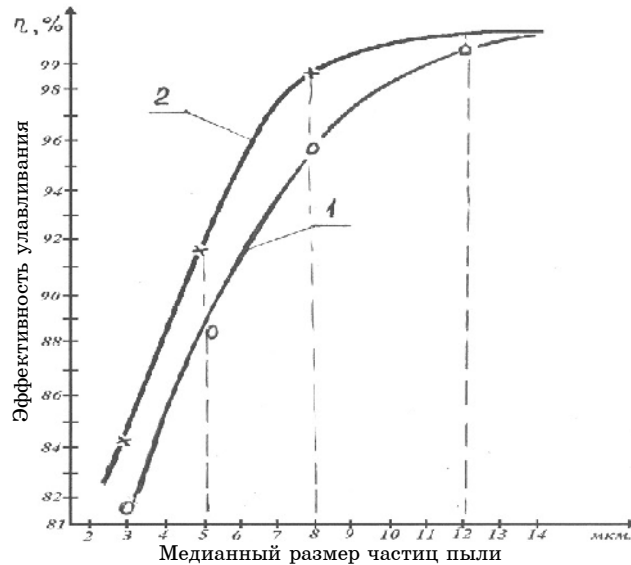


Рисунок 6 - Кривые фракционной эффективности пылеулавливания:
1 - без роторного экрана; 2 - с роторным экраном

Из рисунка 6 видно, что на мелких (3-5 мкм) и средних (8 мкм) диаметрах частиц разность в эффективности улавливания составляет более 2 %, уменьшаясь на крупных (12 мкм) размерах частиц до долей процента.

Следует отметить, что возможности существующего и широко распространённого в промышленности способа контакта твёрдой и жидкой фаз в мокром пылеулавливании далеко не исчерпаны. Опыты показали [3], что изменив способ взаимодействия твёрдой частицы с поверхностью жидкости при их непосредственном контакте, можно добиться более высоких показателей эффективности пылеулавливания.

Рассмотрим предлагаемый способ взаимодействия твёрдой частицы с плёнкой жидкости с учётом рассмотренных выше аспектов.

Как уже отмечено ранее, поверхность жидкости на границе раздела с воздухом представляет собой мономолекулярный слой, обладающий определённым сопротивлением для входа твёрдых частиц. И этот монослой молекул можно условно представить как упругую плёнку определённой степени прочности, частицы которой связаны между собой межмолекулярными силами, ориентированными как в горизонтальном направлении (силы поверхностного натяжения) вдоль поверхности

жидкости, так и внутри слоя жидкости. Последние обеспечивают неразрывность жидкости и удержание монослоя на границе раздела фаз.

Ниже рассматриваются варианты механизмов преодоления сопротивления плёнки жидкости твёрдой частицей в момент их сближения (рис.7)

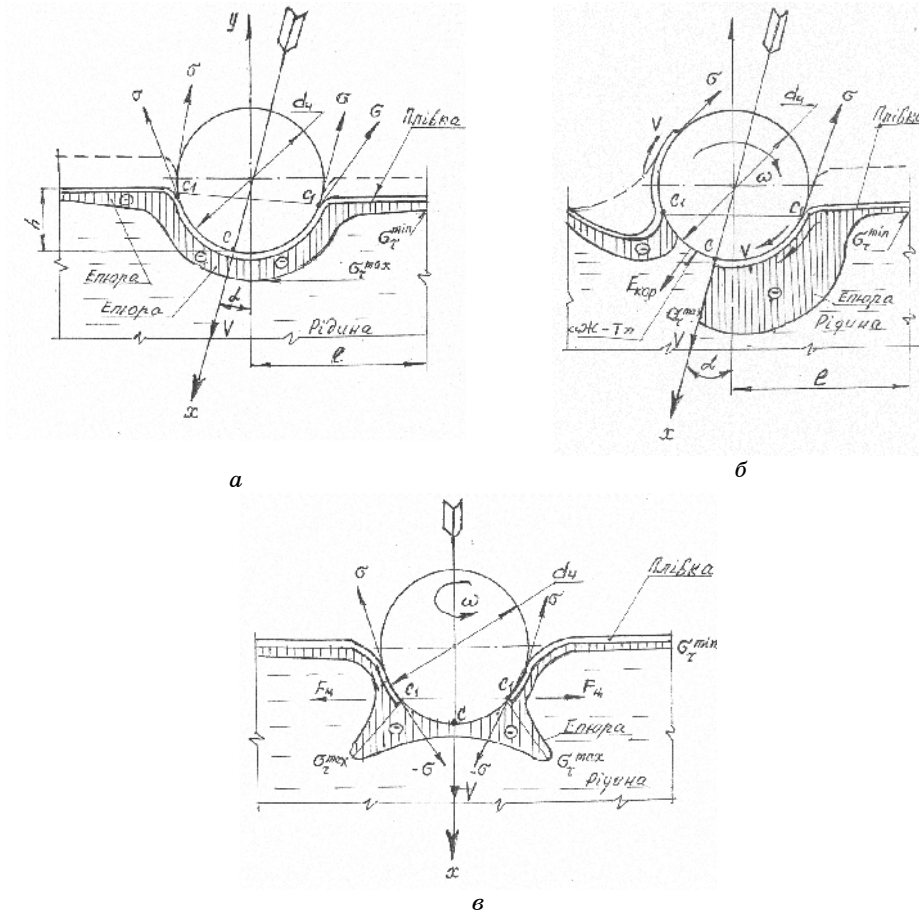


Рисунок 7 – Способы взаимодействия частицы с плёнкой жидкости:
 а – частица движется поступательно без вращения;
 б – частица вращается вокруг горизонтальной оси;
 в – частица вращается вокруг вертикальной оси

В момент контакта поступательно движущейся и обладающей определённой кинетической энергией несмачивающейся твёрдой частицы с жидкостью (рис. 7 а), вначале происходит искривление её поверхности, при этом в поверхностной плёнке возникают растягивающие усилия (показаны в виде эпюры напряжений), направленные исключительно вдоль её поверхности и стремящиеся преодолеть силы сцепления между смежными молекулами монослоя. Причём, чем дальше от места контакта находятся частицы пограничного слоя, тем меньшие напряжения растяжения они испытывают, и на некотором расстоянии величина растягивающих усилий стремится к нулю.

В случае, когда кинетической энергии частицы недостаточно для преодоления сил сопротивления монослоя, то она не считается уловленной и может покинуть место контакта. Если же кинетической

энергии достаточно, то в месте контакта происходит местный разрыв связей между молекулами плёнки с практически мгновенным образованием новой межфазной поверхности, теперь уже между жидкостью и поверхностью твёрдой частицы. При этом силы межмолекулярного взаимодействия, возникающие на границе раздела между свободной жидкостью и твёрдой частицей, значительно слабее, чем в плёнке жидкости на границе раздела с газовой фазой.

Таким образом, широко используемый в технике мокрого пылеулавливания механизм проникновения твёрдой частицы в поглощающую её жидкость основан на ударном воздействии частицы на поверхностный слой жидкости и по сути сводится к замене одной поверхности раздела на другую способом механического разрыва межмолекулярных связей в плоскости плёнки жидкости преимущественно за счёт растягивающих усилий (показаны в виде эпюры).

Рассмотрим способ взаимодействия фаз (рис. 7 б, в), при котором твёрдая частица в момент сближения с плёнкой жидкости обладает энергией двух видов движения – поступательного в направлении контактной поверхности и одновременно вращательного вокруг собственной оси.

Из опыта известно, что при необходимости разделения металлического листа или стержня, например на две части, прибегают не к осевому их растяжению, а к механическим (гильотинным) ножницам, работающим на принципе создания поперечных сдвиговых деформаций. Очевидно, что таким же способом можно разрушить и тонкую плёнку из любого конструкционного материала с помощью местных напряжений сдвига (среза), которые по величине значительно меньше по сравнению с напряжениями растяжения.

Если твёрдой частице, находящейся в несущем её газовом потоке, сообщить кроме поступательного движения ещё и вращательное, то, как видно из рис. 7 б, в, картина взаимодействия твёрдой и жидкой фаз на границе их раздела может кардинально измениться. В этом случае энергия поступательного движения частицы, сообщённая ей движущимся потоком воздуха, в момент контакта с поверхностью жидкости необходима только для полного погружения частицы в жидкость, а энергия вращательного движения расходуется исключительно на преодоление поверхностных сил сопротивления, причём доминирующими напряжениями, приводящими к деструкции пограничного монослоя жидкости, являются напряжения сдвига, возникающие в плёнке при резком воздействии набегающей поверхности вращающейся частицы на ограниченный участок жидкостной плёнки в результате вертикального перемещения смежных молекул. При этом в точке контакта (точка С) возникают и максимальные по величине растягивающие усилия, приводящие к разрыву плёнки и образованию новой поверхности раздела.

При вращении частицы вокруг горизонтальной оси (рис. 7 б), погружающаяся в слой жидкости поверхность увлекает вниз в массу свободной жидкости молекулы, оторванные от пограничного слоя. При этом возникает новая граница раздела: между жидкостью и твёрдым телом. Одновременно с этим противоположная поверхность частицы при движении вверх своей погруженной частью как бы вскрывает снизу пограничный слой, благодаря адгезионным силам увлекает прилегающие к ней слои жидкости и таким образом формирует уже новую смоченную поверхность. Следует отметить, что при контакте с жидкостью вращающейся частицы силы поверхностного натяжения направлены так, что уже в первый её полуоборот вокруг собственной оси способствуют её погружению. Очевидно, что при этом не обязательно выполнение условия

погружения частицы ниже своего миделевого сечения, чтобы быть уловленной.

В том случае, когда частица вращается вокруг своей вертикальной оси, совпадающей с вектором скорости (рис. 7 в), максимальные суммарные напряжения сдвига и растяжения, возникающие в пограничном слое, действуют по периметру в сечении между точками C_1-C_1 , и здесь же происходит мгновенный разрыв пограничного слоя с перемещением частицы вниз за счёт энергии поступательного движения. То есть, частица под действием энергии вращения как бы ввинчивается вглубь жидкости, при этом благодаря центробежным силам, возникающим по периметру линии погружения частицы, значительно ослабляются силы адгезии и трения между её поверхностью и плёнкой жидкости, способствуя погружению частицы под слой.

Таким образом, частица, одновременно участвующая в двух видах движения, за счёт дополнительно сообщённой ей энергии вращения легче погружается в жидкость. Вероятно, что при этом величина кинетической энергии, то есть, работа по погружению дисперсной частицы в жидкость, может быть значительно меньшей, чем только при её поступательном движении.

Следует отметить, что рассмотренные выше аспекты анализа относятся лишь к несмачиваемым частицам сферической формы. В реальных условиях пылеочистки сферическая форма дисперсной фазы практически не встречается, частицы даже одного материала различаются как формой, так и шероховатостью поверхности, степенью абразивности и иными свойствами, в той или иной степени влияющими на эффективность их улавливания аппаратами мокрой очистки.

Рассмотренные выше аспекты осаждения твёрдых частиц на смоченных поверхностях позволяют более глубоко разобраться в сути явления вторичного уноса пыли и причин недостаточно высокой эффективности взаимодействия фаз в системе «жидкость–твёрдая частица» и определить потенциальные направления и способы повышения эффективности мокрого способа пылеулавливания.

С точки зрения практического применения результатов данного исследования, то можно отметить перспективность разработки специального контактного модуля [3], с помощью которого кроме мокрого пылеулавливания возможна реализация и других технологических процессов. Так, например, в процессах восстановления расплавов с помощью углеродных частиц использование нового способа взаимодействия фаз позволит интенсифицировать пирометаллургический процесс за счёт более эффективного «внедрения» твёрдой фазы в стекающую плёнку расплава. Существует также ряд процессов, требующих точного дозирования тонкодисперсных сыпучих материалов в жидкую фазу, например в процессах синтеза полупродуктов и красителей, при суспендировании, растворении, смешивании и др. Проблемы дозирования сыпучих материалов в высоковязкие жидкие композиции – высокомолекулярные соединения (карбамидоформальдегидные смолы, латексы, смазки и т. п.) – при их окрашивании, в другие системы при проведении каталитических процессов, введения относительно небольших по объёму добавок (стабилизаторов, пластификаторов, твёрдофазных диспергаторов, ускорителей твердения смол, антиоксидантов, антистарителей, различного рода ПАВ, трассеров и других компонентов) в жидкости – могут быть решены при использовании нового способа взаимодействия фаз.

Перспективным применением нового способа взаимодействия фаз может быть решение проблем процессов смешивания некоторых веществ, находящихся в различном агрегатном состоянии. Так, известны процессы

смешивания специально подготовленных жидкофазных систем, одна из которых предварительно переводится в твёрдофазное состояние, например, путём замораживания. При этом дисперсная твёрдая фаза предварительно и в требуемом соотношении равномерно распределяется в жидкости с последующим криогенным воздействием на образующуюся таким образом систему. С применением специального контактного модуля эффективность проведения таких процессов может быть более высокой.

ВЫВОДЫ

Результаты анализа известных способов взаимодействия твёрдых частиц с жидкостной плёнкой при мокром пылеулавливании дают возможность прогнозировать перспективность использования предлагаемого способа, который заключается в дополнительном сообщении частицам вращательного движения вокруг собственной оси.

THE PROBLEM OF DEPOSITION OF PARTICLES ON THE LIQUID SURFACE

R. V. Galich*, A. R. Yakuba, V. I. Sklabinsky***, V. Y. Storozhenko***,**

** The Joint-Stock Company "Severodonetsky "ORGHIM",
32 Gvardiyskiy Avenue, Severo-Donetsk 93409, Luhansk region, Ukraine;*

*** Sumy National Agrarian University,
160 Kirov Str., 40021 Sumy, Ukraine;*

**** Sumy State University,
2 Rimsky-Korsakov Str., Sumy 40007, Ukraine*

The analysis of known methods of interaction of the solid particles with the liquid film at wet dedusting enable to predict a promising use of the proposed method, which consists in additional imparting particles revolving around their own axis.

Key words: *dedusting, particulate, film liquid, immersion, vortex apparatus, the rotational motion.*

ДО ПИТАННЯ ОСАДЖЕННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК НА ПОВЕРХНІ РІДИНИ

Р. В. Галич *, О. Р. Якуба **, В. І. Склабінський *, В. Я. Стороженко ***,**

** Приватне акціонерне товариство «Севєродонецький» ОРГХИМ »,
Гвардійський проспект, 32, м. Севєродонецьк, 93409, Луганська обл., Україна;*

*** Сумський національний аграрний університет,
вул. Кірова, 160, м. Суми, 40021, Україна;*

**** Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна*

Результати аналізу відомих способів взаємодії твердих частинок з рідинної плівкою при мокрому пиловловлювання дають можливість прогнозувати перспективність використання запропонованого способу, який полягає в додатковому наданні частинкам пилу обертального руху навколо власної осі.

Ключові слова: *пиловловлювання, тверді частинки, плівка рідини, занурювання, вихровий апарат, обертальний рух.*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сажин Б. С. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Обзорная информация / Сажин Б. С., Гудим Л. И. // Сер.: Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов. – М.: НИИТЭХИМ, 1982.– Вып. I (38). – 48 с.
2. Галич Р. В. Интенсификация центробежной сепарации твёрдых частиц из закрученных потоков в вихревых аппаратах / Р. В. Галич, В. Н. Галич. // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції “Наука і освіта 2003”.– Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2003. – Том 17. Екологія. – С. 55–56.
3. Галич Р. В. Вихревые аппараты с контактным модулем / Р. В. Галич, А. Р. Якуба, С. А. Тимчук, В. Н. Галич // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції “Динаміка наукових досліджень “2004”. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2004. – Т. 34. Екологія. – С. 15–16.
4. Очистка промышленных газов от пыли / Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И., Решидов И. К. – М. : Химия, 1981. – 392 с.

5. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1981. – 296 с., ил.
6. Кузнецов И. Е. Оборудование для санитарной очистки газов: справочник / И. Е. Кузнецов, К. И. Шмат, С. И. Кузнецов; под общ. ред. И. Е. Кузнецова. – К. : Техніка, 1989. – 304 с.
7. Лукин В. Д. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности / В. Д. Лукин, М. И. Курочкина. – Л. : Химия, 1980. – 232 с.
8. Оборудование, сооружения, основы проектирования: уч. пособие для вузов / Родионов А. И., Кузнецов Ю. П., Зенков В. В., Соловьёв Г. С. – М. : Химия, 1985. – 352 с.
9. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справ. изд. / Г. М.-А. Алиев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
10. Коузов П. А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности / П. А. Коузов, А. Д. Мальгин, Г. М. Скрябин. – Л. : Химия, 1982. – 256 с.
11. А. С. № 1535642. Вихревой пылеуловитель / В. Н. Галич. – 1990, БИ №2.
12. Семёнов В. С. Об условиях реагирования частицы угля с расплавом на стенке циклонной камеры : в кн. Циклонные энерготехнологические процессы и установки / В.С. Семёнов, Н. А. Семененко // Материалы научно-технического совещания – М. : МИНЦВЕТМЕТ, 1967. – Ч. II.

Поступила в редакцию 24 января 2013 г.