

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ОСОБЕННОСТИ ОТРЫВА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ПОЛУПРОТИВОТОЧНОМ ГИДРОСЕПАРАТОРЕ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Для повышения эффективности разделения по крупности и плотности минеральных частиц на основе максимально возможной разницы в скоростях их движения предложен полупротивоточный гидросепаратор [1-2], в котором реализована послойная пересортировка посредством разделительных цилиндрических элементов со щелью.

Структура потока суспензии для послойной пересортировки в гидросепараторе обоснована в работах [3-4]. Однако там не отражены вопросы пограничного слоя потока по поверхности разделительных элементов.

При обтекании цилиндра потоком суспензии отрыв ламинарного пограничного слоя происходит при числах Рейнольдса $Re \sim 10$. Если же $Re \leq 1$, то пограничный слой не образуется и силы инерции значительно меньше сил вязкости.

Независимо от числа Рейнольдса (кроме $Re \leq 1$) движение суспензии за цилиндром является вихревым и носит колебательный характер. При этом вниз по потоку формируется двойной ряд вихрей, которые по мере удаления от цилиндра распадаются на более мелкие вихревые структуры. В случае, когда $Re > 2500$ эти вихри разрушаются после своего образования, поэтому вихревой ряд не может существовать. На задней стороне цилиндра вихри периодически отрываются, пока число Рейнольдса не достигнет значения $Re_d = (4-5)10^5$, при котором в спутном следе происходит полное турбулентное перемешивание.

Образование ламинарного пограничного слоя и его отрыв при обтекании цилиндра потоком суспензии связано с влиянием сил внутреннего трения в непосредственной близости от обтекаемой поверхности.

Несмотря на то, что концентрация твердых частиц в суспензии оказывает существенное влияние на структуру пограничного слоя, характер отрыва последнего в основном зависит от гидродинамических параметров набегающего потока вязкой жидкости. Вводя определенные допущения, механизм возникновения отрывного течения можно исследовать на примере движения отдельно взятого единичного объема вязкой жидкости по цилиндрической поверхности разделительного элемента гидросепаратора. Изменение ширины щели этого элемента приводит к изменению давления вязкой жидкости в диффузорной части ламинарного пограничного слоя и смещению точки отрыва. Поэтому важно установить рациональную ширину щели при минимальном гидравлическом сопротивлении разделительного элемента гидросепаратора.

Таким образом, исследование особенностей процесса отрыва пограничного слоя при обтекании потоком вязкой среды цилиндрического разделительного элемента в полупротивоточном гидросепараторе является актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. В работах [5, 6] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса обтекания одиночного цилиндра пространственным потоком вязкой жидкости. Из полученных результатов следует, что теоретическое значение положения точки отрыва ламинарного пограничного слоя характеризуется величиной угла $108,8^\circ$, тогда как ее экспериментально осредненное значение составляет 82° .

При классическом варианте обтекания цилиндра потоком вязкой жидкости на его поверхности одновременно образуются две симметричные точки отрыва ламинарного пограничного слоя [7]. В реальных условиях обтекания (особенно при турбулентном характере набегающего потока) данная симметрия, как правило, не наблюдается. Как показывают исследования [6, 8], вблизи цилиндрической поверхности происходит неравномерное распределение скоростей и давлений. В результате наблюдается попеременный отрыв вихрей с обеих сторон цилиндра, а положение точек отрыва периодически изменяется.

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование особенностей отрыва пограничного слоя при обтекании цилиндрического разделительного элемента в полупротивоточном гидросепараторе.

Изложение материала и результаты. Образование пограничного слоя на поверхности цилиндра при его обтекании потоком вязкой жидкости начинается с формирования заторможенной области течения в непосредственной близости у стенки (вязкий подслой) [7]. Последнее связано с влиянием сил молекулярного сцепления между жидкостью и твердой поверхностью. Начиная с внешней границы вязкого подслоя, следует рассматривать влияние сил внутреннего трения между соседними слоями вязкой среды. По мере удаления от цилиндрической поверхности эти силы ослабевают и принимают некоторое постоянное значение, что и определяет толщину ламинарного пограничного слоя.

Как известно, увеличение давления в диффузорной части ламинарного пограничного слоя на поверхности цилиндра, а также влияние сил внутреннего трения приводит к потерям кинетической энергии частиц жидкости [5]. В результате на некотором расстоянии от передней критической точки формируется заторможенная область течения. Так как за пределами пограничного слоя движение вязкой среды происходит с большей скоростью, то заторможенные частицы жидкости под действием положительного градиента давлений начинают двигаться в обратном направлении, оттесняя вышележащие слои от обтекаемой поверхности, что приводит к отрыву потока.

Мгновенное положение точки отрыва ламинарного пограничного слоя на поверхности цилиндра может быть представлено в виде приближенной функциональной зависимости

$$\alpha_i \approx f(\text{Re}, I), \quad (1)$$

Гравітаційна сепарація

где α_t – угол, характеризующий положение точки отрыва потока вязкой жидкости; Re – число Рейнольдса; I – интенсивность турбулентности, %.

Рассмотрим особенности течения вязкой среды в диффузорной части ламинарного пограничного слоя на поверхности цилиндра. Выделим единичный объем вязкой жидкости (рис. 1)

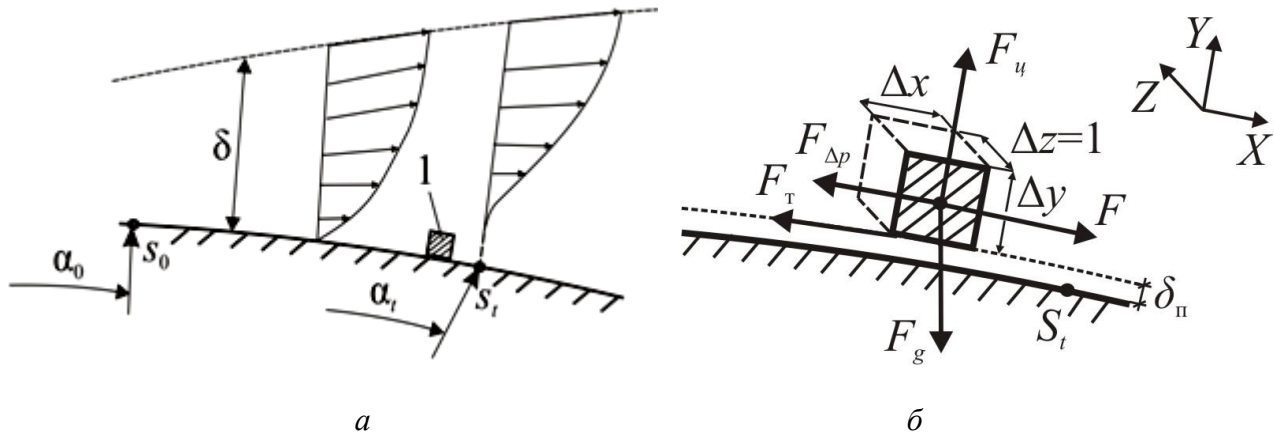


Рис. 1. Схема течения вязкой жидкости в ламинарном пограничном слое на поверхности цилиндра (а) и основных сил, действующих на ее единичный объем (б): δ – текущее значение толщины пограничного слоя; δ_{π} – толщина вязкого подслоя; Δx , Δy , Δz – длина, высота и ширина единичного объема 1; α_0 , α_t – углы, характеризующие положение точки минимума давления S_0 и точки отрыва потока S_t ; F_g , F , $F_{\Delta p}$, F_u , F_T – силы тяжести, инерции, перепада давлений, центробежная и внутреннего трения

Учитывая, что в пограничном слое наиболее выражено влияние сил внутреннего трения [5], а размеры и масса единичного объема незначительны, влиянием центробежной силы и силы тяжести (рис. 1, б), действующих на единичный объем вязкой жидкости можно пренебречь.

Заменяя цилиндрическую поверхность прямолинейными участками длиной Δx , определим величину силы внутреннего трения F_T , возникающей на нижней грани единичного объема (рис. 1, б) площадью $\Delta x \Delta z$. В соответствии с законом Ньютона [7] получим приближенное соотношение

$$F_T \approx \mu \Delta x \Delta z U \delta_{\pi}^{-1},$$

где U – средняя скорость движения единичного объема вязкой жидкости, м/с; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Соотношения для силы инерции [9] и перепада давлений имеют следующий вид:

$$F = \rho [\text{grad}(0,5U + \text{rot } U \times U)] = ma = \rho \Delta x \Delta y \Delta z a;$$

$$F_{\Delta p} = p_{2-1} \Delta y \Delta z,$$

где ρ – плотность вязкой жидкости, кг/м^3 ; a – ускорение единичного объема вязкой жидкости, м/с^2 ; m – масса единичного объема вязкой жидкости, кг ; $p_{2-1} = p_2 - p_1$ – разность давлений вязкой жидкости на участке длиной Δx , Па ; p_1, p_2 – давления вязкой жидкости на левой и правой гранях единичного объема (рис. 1, б), Па .

Учитывая тормозящее влияние градиента давлений в диффузорной части ламинарного пограничного слоя, в соответствии со схемой (рис. 1, б) результирующая сила, действующая на единичный объем, определяется как

$$F_R = F - F_T - F_{\Delta p}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что при выполнении условия: $F_R = -F_{\Delta p}$ возникает обратное течение.

Работа, затрачиваемая на перемещение единичного объема вязкой жидкости на участке цилиндрической поверхности, заключенного между точкой минимума давления и точкой отрыва (рис. 1, а), будет определяться как

$$A = F_R l = F_R \pi R (\alpha_t - \alpha_0) (180^\circ)^{-1},$$

где R – радиус цилиндра, м ; l – длина участка цилиндрической поверхности, м .

Тогда величина кинетической энергии элементарного объема в конце этого участка и соответственно потери кинетической энергии определяться так:

$$E_{к,0} = 0,5mU_0^2 = A;$$

$$\Delta E_l = E_{к,m} - E_{к,0} = 0,5m(U_m^2 - U_0^2),$$

где U_0, U_m – скорости движения единичного объема вязкой жидкости в непосредственной близости от заторможенной области течения и в точке минимума давления, м/с .

В реальных условиях обтекания цилиндра потоком вязкой жидкости распределение величины коэффициента давления по его поверхности будет отличаться от теоретического (рис. 2)

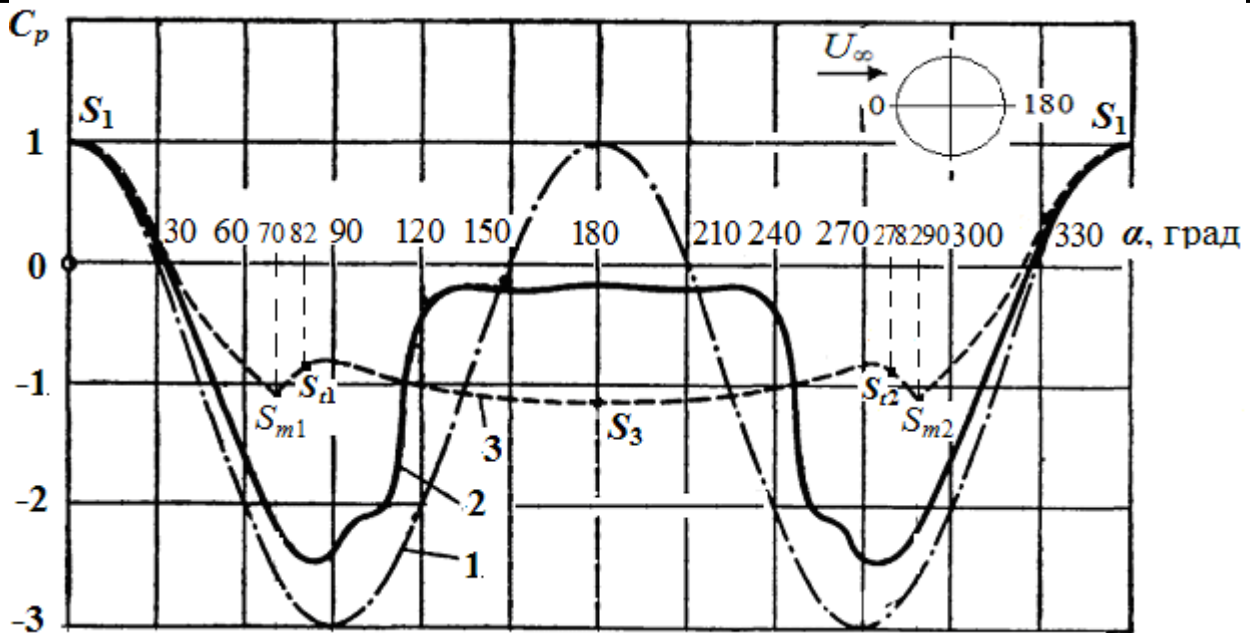


Рис. 2. Распределение величины коэффициента давления по поверхности цилиндра [5]: 1 – теоретическое; 2, 3 – при сверхкритическом ($Re_{св} = 6,7 \cdot 10^5$) и докритическом числе Рейнольдса ($Re_{док} = 1,86 \cdot 10^5$); S_{m1} , S_{m2} – точки, где наблюдается минимум давления; S_{t1} , S_{t2} – точки, где наблюдается отрыва ламинарного пограничного слоя; S_1 , S_3 – передняя и задняя критические точки

Анализ экспериментальных зависимостей 2, 3 (рис. 2) показывает, что они наиболее точно аппроксимируются полиномиальной кривой.

Полиномиальные зависимости являются достаточно громоздкими и не позволяют установить закономерность изменения исследуемого параметра. В связи с этим целесообразно рассмотреть отдельные участки цилиндрической поверхности, на которых распределение коэффициента давления можно описать более простыми функциями.

Из рис. 2 следует, что при докритическом числе Рейнольдса отрыв ламинарного пограничного слоя возникает в точках S_{t1} и S_{t2} (соответственно $\alpha = 82$ и 278°). При этом в отличие от теоретического распределения, давление будет достигать своего минимума не только в точках S_{m1} и S_{m2} (соответственно $\alpha = 70$ и 290°), но и в задней критической точке S_3 ($\alpha = 180^\circ$).

Рассмотрим экспериментальную зависимость 3 при $Re_{док} = 1,86 \cdot 10^5$ (рис. 2). Построим отдельные аппроксимирующие кривые для каждого из участков этой зависимости (рис. 3)

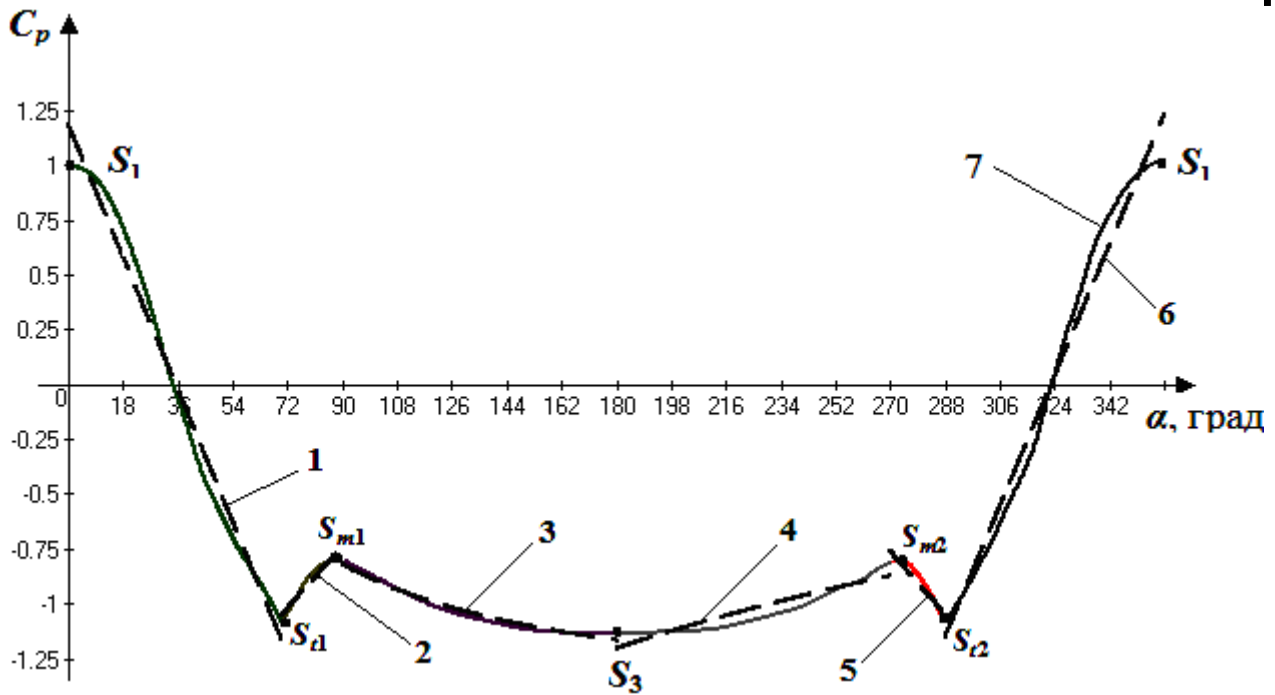


Рис. 3. Аппроксимирующие (1-6) и экспериментальная (7) кривые распределения величины коэффициента давления вязкой жидкости по поверхности цилиндра при $Re_{док} = 1,86 \cdot 10^5$

Учитывая симметричный характер распределение величины коэффициента давления вязкой жидкости (рис. 2), рассмотрим лишь кривые 1-3 (рис. 3), уравнения которых имеют следующий вид:

$$\begin{cases} C_{p1} = -0,0335657\alpha + 1,1862617; \\ C_{p2} = 1,2053926\ln(\alpha) - 6,1769113; \\ C_{p3} = 62,6013989\alpha^{-1} - 1,5151467. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений (3) описывает распределение величины коэффициента давления вязкой жидкости по поверхности верхней части цилиндра между передней и задней критическими точками. Если предположить, что в некотором диапазоне чисел Рейнольдса ($Re_0 \leq Re \leq Re_{док}$) характер распределения коэффициента давления идентичен экспериментальному (рис. 3), то тогда получим:

$$\begin{cases} C_{p1} = A_1\alpha + A_2; \\ C_{p2} = A_3\ln(\alpha) + A_4; \\ C_{p3} = A_5\alpha^{-1} + A_6, \end{cases} \quad (5)$$

где $A_1 - A_6$ – числовые коэффициенты, определяемые экспериментально.

По результатам экспериментальных исследований обтекания цилиндра вязкой жидкостью для каждого числа Рейнольдса рассматриваемого диапазона

Збагачення корисних копалин, 2012. – Вип. 51(92)

Гравітаційна сепарація

определяют величину коэффициента A_i ($i = 1 - 6$), а затем – осредненные значения \bar{A}_i для всего интервала $Re_0 \leq Re \leq Re_{док}$.

При обтекании цилиндрического разделительного элемента со щелью возникающий перепад давлений способствует движению вязкой среды через щель во внутреннюю полость цилиндра. При этом вблизи щели формируется обратное течение, оттесняющее ламинарный пограничный слой от обтекаемой поверхности. Течение вязкой жидкости через щель приводит к снижению градиента давлений по длине диффузорной части пограничного слоя. Это приводит к смещению точки отрыва потока в сторону задней критической точки.

С учетом влияния щели на гидродинамику обтекания цилиндрического разделительного элемента потоком вязкой жидкости систему уравнений (5) можно представить в виде:

$$\begin{cases} C_{p1} = A_1 A_7 \alpha + A_2 A_8; \\ C_{p2} = A_3 A_9 \ln(\alpha) + A_4 A_{10}; \\ C_{p3} = A_5 A_{11} \alpha^{-1} + A_6 A_{12}, \end{cases}$$

где $A_7 - A_{12}$ – поправочные коэффициенты, характеризующие влияние ширины щели на изменение величины кинетической энергии вязкого течения и градиента давления по длине диффузорной части ламинарного пограничного слоя, определяемые как:

$$A_k = f(h, \text{grad}_l p_0, \Delta E_l),$$

где $k = 7 - 12$; h – ширина щели в цилиндре, м; p_0 – полное давление вязкой жидкости, Па.

Выводы и направления дальнейших исследований:

- при обтекании цилиндра вязкой жидкостью ($Re_{док} = 1,86 \cdot 10^5$) величина коэффициента давления по его поверхности в диапазонах $0-70^\circ$, $70-82^\circ$ и $82-180^\circ$ изменяется зависимостями $C_p = f(\alpha)$, которые для цилиндрического разделительного элемента со щелью дополняют поправочными коэффициентами, учитывающих влияние ее ширины на изменение кинетической энергии потока и градиента давления по длине диффузорной части ламинарного пограничного слоя;

- полученная закономерность изменения величины коэффициента давления вязкой жидкости по поверхности цилиндрического разделительного элемента при исходных данных, соответствующих реальным условиям работы гидросепаратора, позволяет установить рациональную ширину щели его разделительного элемента с минимальным гидравлическим сопротивлением;

- увеличение ширины щели в цилиндре приводит к уменьшению градиента давления по длине диффузорной части ламинарного пограничного слоя и

смещению точки отрыва в сторону задней критической точки, что снижает гидравлическое сопротивление разделительного элемента. При этом гидродинамический режим за точкой минимума давления способствует формированию однородной по составу зерен структуры потока суспензии в зоне ее захвата щелью разделительного элемента

Дальнейшие исследования автора будут направлены на изучение влияния конструктивно-технологических параметров гидросепаратора на эффективность его работы.

Список литературы

1. А.с. 1247094 СССР, МКИ В 04 С 3/06, 5/04. Гидросепаратор для классификации и обогащения полезных ископаемых [Текст] / Н.Г. Бедрань, Н.М. Беляев, В. И. Кривошеков, А. А. Приходько (СССР). – Оpubл. 30.07.86. Бюл. №28.
2. А.с. 1662700 СССР, МКИ С 3/06, 5/04, В 03 В 5/62. Гидросепаратор для классификации и обогащения полезных ископаемых [Текст] / В.И. Кривошеков – Оpubл. 15.07.91. Бюл. №26.
3. Кривошеков, В.И. Тонкослойная гидросепарация минеральных зерен [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: Наук.- техн. зб. – 2000. – Вип. 8(49). – С. 86 – 90.
4. Кривошеков, В.И. Новое формирование потока пульпы в гидросепараторе [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: Наук.- техн. зб. – 2000. – Вип. 9(50). – С. 33 – 36.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
6. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
7. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкостей и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 906 с.
8. Кривошеков В.И. Исследование обтекания цилиндров пространственным потоком вязкой жидкости [Текст] / В.И. Кривошеков // Науковий вісник НГУ. – 2012. – №3. – С. 13-25.
9. Фортъе А. Механика суспензий [Текст] / А. Фортъе. – М.: Мир, 1971. – 264 с.

© Кривошеков В.И., 2012

*Надійшла до редколегії 18.09.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Б.О. Блюсом*