

Надутый В. П.
Елисеев В. И.
Луценко В. И.
Хмеленко И. П.

**Институт
геотехнической
механики
им. Н. С. Полякова
НАН Украины**

УДК 622.7:741.6:532.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТИ В ЯЧЕЙКЕ СИТА ОБЕЗВОЖИВАЮЩЕГО ГРОХОТА

У статті наведено підсумкові результати досліджень рівноважного стану рідини в чарунці сита зневоднювального грохота. Отримано основні залежності, що характеризують рівноважний стан у найбільш характерних випадках.

The aggregate results of researches of the equilibrium state of liquid in the cell of sieve of dehydrating screen are resulted in the article. Basic dependences characterizing the equilibrium state in most characteristic cases are got.

В результате эксплуатации вибрационных грохотов при классификации влажной горной массы отмечается резкое снижение эффективности грохочения. Особенно существенно влияние влаги при классификации мелких и тонких классов, когда процесс разделения твердых частиц замедляется под влиянием поверхностных пленок на сетке, поверхностное натяжение которых преодолеть для мелких частиц без дополнительных ускорений трудно. Поэтому возникла необходимость изучения равновесного слоя жидкости в капиллярной ячейке сита [1]. В гидромеханике по данному вопросу решены задачи определения равновесной конфигурации капиллярной жидкости, определены модели равновесных фигур условия их устойчивости. Однако во всех указанных случаях рассматривается капиллярность жидкости в сосудах, порах, трубках. В нашем случае рассматривается задача о равновесном состоянии жидкости с известными капиллярными свойствами в круговой ячейке сита, образованной волокном с различной степенью смачиваемости.

Целью настоящей работы является обобщение результатов, выполненных авторами по изучению процессов свободного истечения жидкости через ячейку сита с учетом прохождения через нее твердых частиц в потоке жидкости, а также по моделированию этих процессов.

В работе [1] на основе уравнения гидростатики рассмотрены задачи о равновесии неподвижных капиллярных жидкостей в ячейке сита, при этом

принимались во внимание оба возможных варианта: несмачивающая жидкость (рис.1) и смачивающая жидкость (рис.2) относительно материала сетки. Для варианта несмачивающей жидкости получены аналитические выражения для определения высоты слоя поверхностной пленки в ячейке сита и показано, что с понижением толщины слоя пленки возрастает слой жидкости, удерживаемый ячейкой сетки над сеткой, что приводит к опусканию жидкости в центре ячейки. При понижении толщины пленки в ячейке происходит потеря статического равновесного состояния, разрыв мениска и истечение жидкости через ячейку сита.

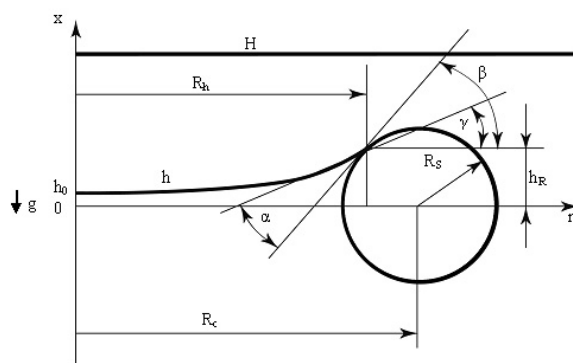
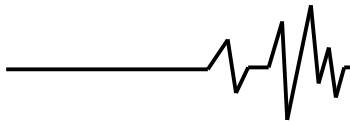


Рис. 1. Расчетная схема равновесия слоя несмачивающей жидкости в ячейке капиллярной сетки

Высота слоя поверхностной пленки в ячейке сита:

$$h = H - \frac{R_h \theta}{k R_s J_1(k)} J_0(kn),$$



где H – верхний уровень слоя жидкости в ячейке сита; R_h – радиус окружности, по которой жидкость контактирует с поверхностью волокна; $\theta = \gamma \cos \alpha$ (γ – угол между касательной к поверхности жидкости в точке зацепления и прямой параллельной оси абсцисс); J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $k = Bo^{1/2}$ – число Бонда в степени $1/2$; $n = r/R_h$; r – расчетный радиус; R_s – радиус волокна сетки; J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка

Поскольку для смачивающей жидкости равновесие слоя представлено не вогнутостью, а выпуклой пленкой мениска, то его равновесное состояние будет иметь другой вид.

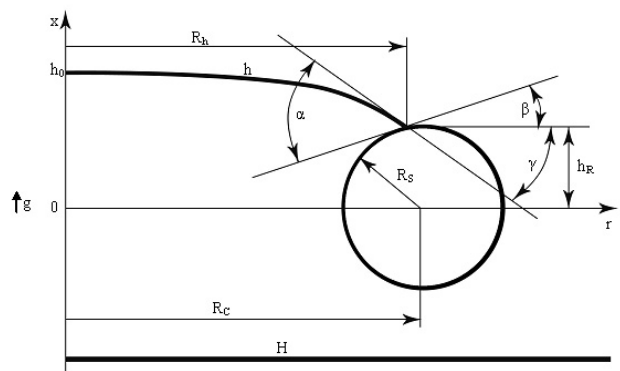


Рис. 2. Расчетная схема равновесия слоя смачивающей жидкости в ячейке капиллярной сетки

В этом случае получено аналитическое выражение для высоты поверхности в точке смачивания сетки жидкостью:

$$h = -H - \frac{R_h \theta}{k R_s J_1(k)} J_0(kn).$$

Анализ выражения показывает, что с понижением толщины слоя пленки мениска выпуклость его уменьшается и превращается в пленку, находящуюся в равновесии с соседними ячейками сита и объединяет их. Для преодоления такой пленки потребуются дополнительные усилия. Причем поверхности пленок имеют разный объем, который может перейти в каплю и в случае большой массы капли, происходит ее выталкивание из занятого объема и этим нарушается равновесное состояние жидкости в ячейке. Полученные в работе аналитические зависимости позволяют определить геометрические параметры пленок, условия их разрыва или равновесного состояния.

Наличие тонкого слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита представляет собой отдельную задачу, имеющую практический интерес, поскольку отражает условия грохочения через мелкое ячеистое сито. В этом случае возможны разные варианты, влияющие на равновесное состояние тонкого слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита. Например, частица смачивается или не смачивается жидкостью. В этих случаях слой жидкости, вмещающий частицу, ведет себя по-разному. Эти задачи рассмотрены в работах [2, 3]. Они отличаются от равновесного состояния пленки в ячейке сита без твердой частицы [1] дополнительными особенностями, заключающимися в том, что в них математически учтено удержание частицы на нижней поверхности слоя жидкости, которое обусловлено равенством сил, действующих на частицу. Это сила тяжести частицы, сила Архимеда и сила капиллярного натяжения. Конфигурации расчетных схем при определении равновесного состояния изменялись в зависимости смачиваемости частицы жидкостью и положением частицы в слое смачиваемой жидкости.

Условие равновесия частицы в слое смачивающей жидкости средней толщины (рис.3) имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{4}{3} \pi \rho_c g R_c^3 + \pi R_c^2 \cdot \Delta p_c \sin^2 \psi_{ch} - \\ & - \frac{2}{3} \pi \rho g R_c^3 (1 + \cos^3 \psi_{ch}) = \\ & = -2\pi \sigma R_c \frac{\theta_{ch}}{(1 + \theta_{ch}^2)^{1/2}} \sin \psi_{ch}, \end{aligned}$$

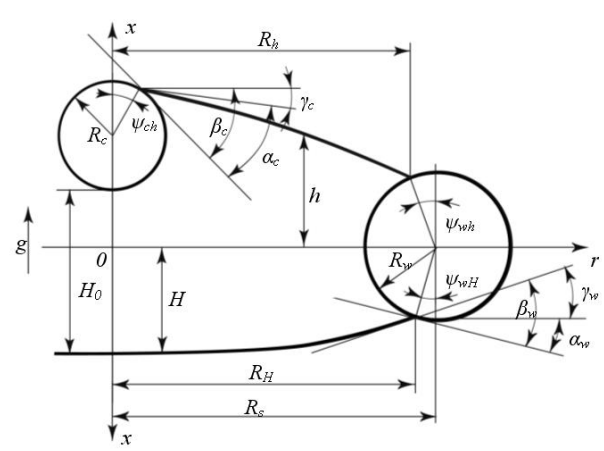
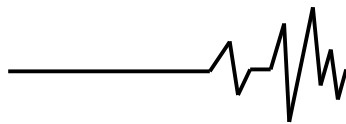


Рис. 3. Схема положения частицы в слое смачивающей жидкости средней толщины



где $\Delta p_c = \rho g R_w \left(H_0 - H + \frac{R_c}{R_w} - h_* \right)$;

$h_* = \frac{p_a - p_0}{\rho g R_w}$; p_a – атмосферное давление;

p_0 – давление на уровне центра волокна; ρ – плотность жидкости, кг/м²; g – ускорение свободного падения тела, м/с²; R_w – радиус окружности контакта верхней поверхности жидкости с волокном; R_c – радиус частицы; σ – коэффициент поверхностного натяжения; ψ_{ch} и ψ_{wh} – углы обхвата волокна и частицы слоем жидкости; H_0 – расстояние от поверхности жидкости до частицы.

Условие равновесия, когда смачиваемая частица в ячейке сита находится под тонким слоем смачивающей жидкости (рис.4) имеет вид:

$$\frac{4}{3} \pi \rho_c g R_c^3 + \pi R_c^2 \cdot \Delta p_c (\sin^2 \psi_{ch} - \sin^2 \psi_{wh}) - \frac{2}{3} \pi \rho g R_c^3 (\cos^3 \psi_{ch} + \cos^3 \psi_{wh}) = -2\pi\sigma R_c \left[\frac{\theta_{ch}}{(1+\theta_{ch}^2)^{1/2}} \sin \psi_{ch} + \frac{\theta_{wh}}{(1+\theta_{wh}^2)^{1/2}} \sin \psi_{wh} \right]$$

где $\Delta p_c = \rho g X_{sc}$; X_{sc} – безразмерная координата центра частицы; θ_{ch} и θ_{wh} – связаны с краевым углом жидкости α_c на поверхности твердого тела соотношениями:

$$\theta_{ch} = \frac{tg\alpha_c + tg\beta_c}{1 - tg\alpha_c \cdot tg\beta_c}, \theta_{wh} = \frac{tg\alpha_w - tg\beta_w}{1 + tg\alpha_w \cdot tg\beta_w}$$

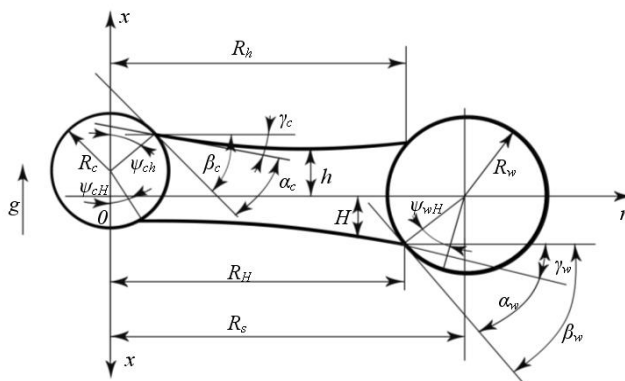


Рис. 4. Схема положения частицы в тонком слое смачивающей жидкости

Условия равновесия, когда частица не смачивается слоем жидкости в ячейке сита (рис.5) имеет вид:

$$\frac{4}{3} \pi \rho_c g R_c^3 - \pi R_c^2 \cdot \Delta p_c \sin^2 \psi_{wh} - \frac{2}{3} \pi \rho g R_c^3 (1 - \cos^3 \psi_{wh}) = 2\pi\sigma R_c \frac{\theta_{wh}}{(1+\theta_{wh}^2)^{1/2}} \sin \psi_{wh}$$

где $\Delta p_c = -\rho g R_w (h_* + X_{sc})$.

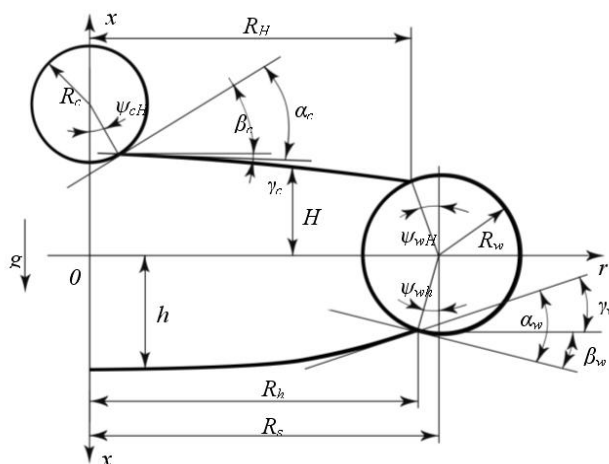
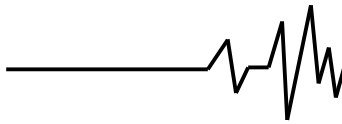


Рис. 5. Схема положения частицы в слое несмачивающей жидкости

Таким образом, рассмотренные случаи равновесного состояния частицы, находящейся в толстом слое жидкости в ячейке сита показывают зависимость толщины слоя от размеров частицы и указывают на существенную проблему для просеивания частиц через мелкие ячейки сита при наличии жидкости в слоях сыпучих материалов. Показано также влияние смачиваемости частицы и материала сетки на равновесное состояние частицы и основные факторы, влияющие на ее прохождение через слой жидкости и ячейку сита.

Одним из характерных случаев в процессе тонкой классификации и обезвоживания на вибрационных грохотах является наличие под сеткой висящих капель жидкости с твердыми частицами, которые в самых нежелательных для технологии грохочения случаях, могут даже объединяться в подрешетную пленку жидкости. В случае висящих капель с частицами подрешетного продукта (рис.6) необходимо рассмотреть устойчивость капиллярной системы и отрыва перетяжки в виде жидкостной связи между



подрешетной частицей и пленкой на сетке грохота. Подробно эта задача рассмотрена в работе [4], где приведен приближенный подход в виде системы в некоторых промежуточных квазиравновесных состояниях, предложенных в работе [5]. Опытно установлено, что для разрушения рассматриваемых капиллярных структур необходима значительная величина возмущений, которую должна обеспечить вибрационная установка для тонкой классификации и обезвоживания. Поэтому при отрыве частицы жидкости с твердым включением от другой, связанной с ней слоем жидкости, необходимо определить энергетические характеристики связи, необходимые для оценки общего энергетического потенциала обезвоживания или вибрационного грохочения пульпы.

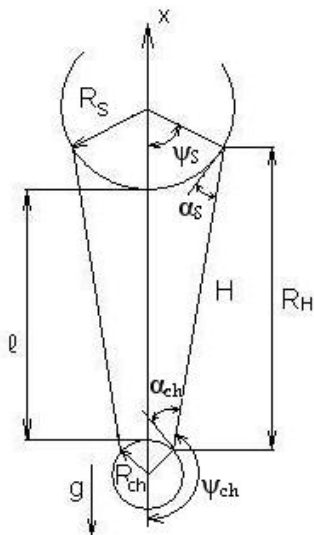


Рис. 6. Схема положения частицы, висящей на перетяжке жидкости

Рассматривая схему, в которой твердая частица сферической формы висит на перетяжке жидкости, учитывалось, что перетяжка растягивается, ее конфигурация поверхности и усилия в ней изменяются при условии, что объем жидкости в ней остается постоянным [4]. Определив силу, действующие на частицу в перетяжке при известном расстоянии между частицами с учетом вынуждающей силы привода грохота, получено выражение для определения полной работы вынуждающей силы:

$$A = \int_0^{l_{ot}} F dx = \frac{2}{3} \pi \rho_{ch} R_{ch}^3 (2\pi f)^2 l_{ot}^2 + A_{\Sigma} ,$$

где A_{Σ} – сумма работ, действующих сил на вытягивание перетяжки с частицей; l_{ot} – максимальное расстояние, на которое

вытягивается частица на перетяжке за четверть периода $\left(t = t_0 = \frac{1}{4} f \right)$ ее колебательного движения по закону $x = X \sin(2\pi ft)$; f – частота колебаний; ρ_{ch} – плотность материала частицы; R_{ch} – радиус твердой частицы; F – вынуждающая сила.

Соответствующая этой работе мощность может быть представлена в виде:

$$N = \frac{A}{t_0} = \frac{8^2}{3} \pi^3 \rho_{ch} R_{ch}^3 l_{ot}^2 f^3 + 4 A_{\Sigma} f .$$

Вывод

Таким образом, в данной работе рассмотрены различные варианты и условия равновесного состояния жидкости в ячейке обезвоживающего сита, рассмотрена оценка величины работы и энергии для отделения частицы в процессе одного из типичных ее состояний в перетяжке. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для оценки физического состояния при обезвоживании влажных сыпучих материалов на виброгрохотах для тонкой классификации обезвоживания горной массы.

Литература

1. Елисеев В.И. Равновесные слои жидкости в капиллярной ситовой ячейке / В.И. Елисеев, В.И. Луценко, В.П. Надутый, И.П. Хмеленко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2008. – Вып. № 74. – С. 44–54.
2. Надутый В.П. Определение равновесного состояния тонкого слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита грохота / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск. – 2008– Вип. № 9. – С. 81–85.
3. Надутый В.П. Определение условия равновесия слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко // Вісник ХПІ. – Харьков – 2008 – Вип. № 38. – С. 22–28.
4. Надутый В.П. Определение условий равновесного состояния частицы, висящей на перетяжке жидкости / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск. – 2008. – Вип. № 10. – С. 46–49.
5. Финн Р. Равновесные капиллярные поверхности. Математическая теория. – М.: Мир, 1989. – 312 с.