© В.Я. Потапов, В.В. Потапов,
Я.И. Конев, Л.А. Семериков, 2015

УДК 621.928.622.273, 622.44

В.Я. Потапов, В.В. Потапов, Я.И. Конев, Л.А. Семериков

РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ТРАНСПОРТНО-ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ ФРИКЦИОННОГО СЕПАРАТОРА

Рассмотрен физический признак, используемый при обогащении асбеста, слюды различная скорость витания в воздушной среде асбестового волокна, чешуек слюды и породы. Приведены формулы для определения скорости витания частиц в воздухе. Их вид зависит от физических характеристик разделяемого материала и свойств воздушного потока. Рассмотрены математические закономерности поведения частиц минералов в циркулирующем потоке воздуха фрикционного сепаратора. Установлены зависимости между давлением воздушного потока и конструктивными параметрами фрикционного барабанно-полочного сепаратора.

Ключевые слова: скорость витания, «парусность», физические характеристики, фрикционный сепаратора, аэродинамический эффект.

Одним из путей повышения эффективности производства является создание менее энергоемких разделительных аппаратов на базе их технологии переработки полезных ископаемых.

Поэтому важно при разработке и проектировании аппаратов использовать их конструктивные особенности для качественного разделения горных пород по физическим характеристикам. Аппаратом для разделения таких руд является барабанно-полочный фрикционный сепаратор (БПФС).

Он представляет собой совокупность нескольких механических устройств, каждое из которых предназначено для разделения частиц обогащаемого материала по различным признакам (рис. 1).

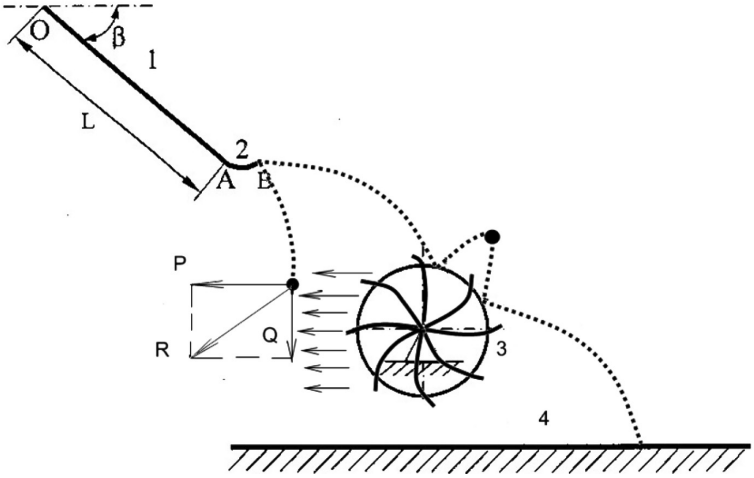

Рис. 1. Схема движения частицы в барабанно-потолочном фрикционном сепараторе

Выделяются четыре фазы движения материала в сепараторе (рис. 1).

Первая-движение материала по наклонной полке, где происходит формирование потока перед вводом в камеру сепаратора. Вторая фаза-распределение сепарируемого материала по граничащим друг с другом потокам с преобладанием в каждом однородных по форме и плотности частиц, происходящее в воздушной камере с момента отрыва частиц от нижней кромки наклонной полки. Третья фаза-разделение компонентов под действием потока воздуха, направленного по нормали к вектору скорости сепарируемых частиц. Четвертая фаза-поверхность вращающегося барабана, на торцевых поверхностях которого установлены радиальные выгнутые лопатки.

Наклонная плоскость (полка *1*) подготавливает к разделению частицы с различными коэффициентами трения. Чем меньше коэффициент трения частицы о плоскость, тем выше скорость частицы на выходе с плоскости. Направления скоростей всех частиц одинаковы, тем не менее модули скоростей различны, и, следовательно, создаются предпосылки для последующего разделения частиц с различным содержанием полезных компонентов (а, значит, и с различными коэффициентами трения). Наклон плоскости должен обеспечивать движение частиц без остановки в середине пути, это накладывает определенные ограничения на угол β: для всего спектра коэффициентов трения этот угол должен быть не менее соответствующих значений углов трения. Значит, угол наклона полки должен быть больше самого большого из возможных значений углов трения для частиц обогащаемого материала с различным содержанием полезного компонента. В силу этого угол β должен иметь довольно большое значение, и, если частица после окончания плоскости выйдет на участок свободного полета с малой скоростью, то полет этот начнется по относительно отвесной траектории, что при больших сопротивления воздуха приведет к движению по вертикали. Таким образом, наклонная плоскость должна заканчиваться трамплином в виде криволинейного участка поверхности для изменения направления скорости частицы.

Криволинейный трамплин *2* можно считать вторым этапом подготовки частиц с различными коэффициентами трения к разделению. Сила трения на этом участке меняется в зависимости от места нахождения частицы, так как в различных точках вогнутой траектории нормальное давление частицы на криволинейную поверхность различное. Поэтому если на первом этапе движение равноускоренное, то на втором подчиняется довольно сложному закону. Падение скорости на криволинейном участке, следовательно, нелинейно зависит от коэффициента трения. В результате при выходе частиц на участок свободного полета они имеют существенно различные скорости, а вылет частиц происходит по настильным траекториям. Таким образом, образуется веер разделения, благодаря которому возможно формирование продуктов частиц с различным содержанием полезного компонента.

Для частиц средней части веера разделения в барабанно-полочном сепараторе предусмотрена еще одна стадия разделения. Для этого установлен вращающийся барабан *3*, благодаря которому происходит разделение частиц с различными коэффициентами восстановления при ударе. Поскольку поверхность вращающегося барабана не является абсолютно гладкой, то в точке контакта на частицу кроме нормальной реакции действует еще и сила трения, направленная в сторону, противоположную относительной скорости частицы. В зависимости от направления этой силы отскок частицы может происходить как в сторону вращения барабана, так и в противоположную сторону.

Существенное влияние на процесс разделения оказывает и поток воздуха, циркулирующий вокруг вращающегося барабана с лопатками. Можно полагать при этом, что скорость циркуляции потока убывает по мере удаления от поверхности барабана, а на поверхности барабана имеет скорость, близкую к скорости самой этой поверхности,

Процесс движения каждой частицы, возможно, описать математической моделью, включающей уравнения движения на каждом этапе разделения и дифференциальные уравнения движения частицы в циркулирующем потоке воздуха.

Для единообразия описания движения частицы на каждом этапе введем общую для всех элементов механической системы систему координат xOy, начало которой разместим в начале наклонной плоскости, ось «x» направим горизонтально, а ось «y» – вертикально вниз (рис. 2).

Свободный полет частицы начинается из точки B со скоростью V_B, направленной по касательной к дуге окружности трамплина в данной точке. На частицу действует сила сопротивления циркулирующего потока, пропорциональная скорости частицы относительно потока. Коэффициент этой пропорциональности обозначим через μ, который зависит от аэродинамического сечения частицы, вязкости среды и скорости движения потока.

Задаваемыми параметрами барабана считаем: координаты его центра C (a, b), радиус барабана R и его угловую скорость ω. Если частица при движении коснется поверхности барабана, то произойдет удар. Параметрами удара являются: k – коэффициент восстановления и λ – коэффициент трения при ударе.

Если сопротивление движению при свободном полете отсутствует, то частица движется с ускорением свободного падения g, направленным параллельно оси Oy, поэтому движение вдоль оси Ox равномерное. Согласно этому имеем

$$\begin{cases} x = x_B + V_{B_x} \cdot t, \\ y = y_B + V_{By} \cdot t + 0{,}5g \cdot t^2 \end{cases} \quad (1)$$

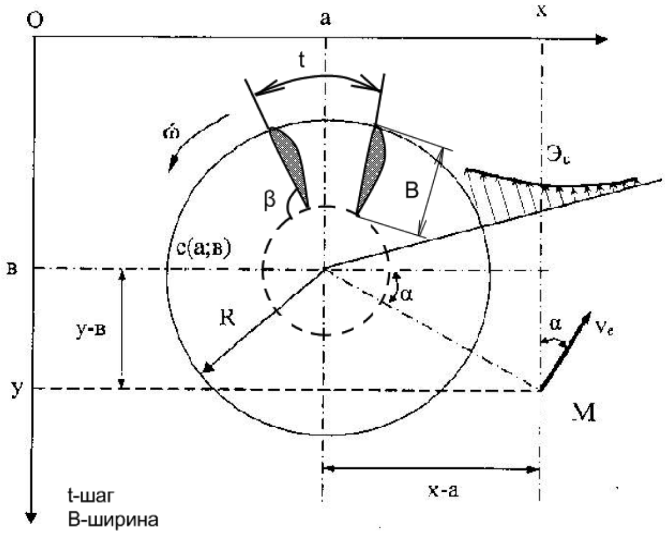

Рис. 2. К определению силы сопротивления на участке свободного полета

Следовательно, движение частицы происходит по траектории параболы

$$y = y_B + tg(\beta - \gamma)(x - x_B) + \frac{[g(x - x_B)^2]}{V_B^2 \cos^2(\beta - \gamma)}, \quad (2)$$

где β – угол наклона полки, град. , γ – центральный угол криволинейного трамплина, град.

Циркулирующий поток в этом случае не оказывает на движение частицы никакого влияния, и частица движется по указанной параболе до тех пор, пока не встретится с поверхностью барабана или не упадет на горизонтальную плоскость ($y = c$). Вместе с тем, как показывают многочисленные исследования, поток воздуха, обтекающий подвижную частицу, создает силу сопротивления движению, направленную в сторону, противоположную скорости частицы $V_г$ относительно потока.

Полагая движение воздуха вокруг вращающегося барабана ламинарным, т.е. пренебрегая возникновением мелких пульсирующих вихрей, примем движение потока слоистым по концентрическим окружностям с центром на оси вращения барабана (рис. 2). Сила сопротивления движению частицы при этом подчиняется закону Стокса:

$$\vec{F}_c = -\mu \cdot \vec{V}_r, \quad (3)$$

где $\mu = \Psi \cdot d^2 \cdot \rho_в \cdot V_r$.

После подстановки в уравнение (3) значение μ получаем квадратичный закон сопротивления движению частицы:

$$F_c = \Psi \cdot d^2 \cdot \rho_в \cdot V_r^2, \quad (4)$$

где Ψ – коэффициент сопротивления; d – диаметр частиц, м; $\rho_в$ – плотность воздуха кг/м^3; $V_г$ – скорость движения струи воздуха, м/с.

При падении в сепаратор одной частицы диаметром d на нее действуют и силы тяжести:

$$G = mg, \quad (5)$$

где m – масса частицы, кг; g – ускорение силы тяжести м/с^2.

Коэффициент пропорциональности μ с учетом скорости потока V_e от вращающего барабана можно записать в виде уравнения:

$$\mu = \psi d^2 \rho_в \sqrt{(x - V_{ex})^2 + (y - V_{ey})^2} \quad (6)$$

Эффективность разделения минералов можно повысить за счет установки специальных лопаток на торцевых поверхностях вращающегося барабана, наклоненных к поверхности торцевых сторон, позволяющих использовать аэродинамический эффект для выделения минералов (асбест, слюда) обладающих эффектом «парусности» из средней части образованного веера при сходе с плоскости.

Специфические свойства асбеста – волокнистое строение, слюды – мелкочешуйчатое строение, способность их расщепляться, первых на тончайшие волокна, вторых на тонкие пластины, тем самым увеличивать поверхность и приобретать свойства «парусности» – обуславливает основной метод разделения асбестовых руд и мелкочешуйчатых слюда содержащих сланцев – сухой гравитационный [3].

В практике для их разделения используют пневмосепарацию, основанную на различии аэродинамических свойствах вскрытого и расщепленного асбеста, для слюды-образовании большого количества пластинчатых чешуек.

Рассмотрим процесс разделения этих минералов в воздушном потоке, создаваемом вращающимся барабаном.

Разделение асбеста, слюды и зерен пустой породы основано на различии в скоростях витания. Руда падает сверху вниз, а воздушная струя продувает ее в горизонтальном направлении (рис. 1).

Скорость витания зависит от физических свойств транспортируемых продуктов: их плотности, состояния поверхности (гладкая, рваная), размеров, формы и петрографического состава частиц, образования вихреобразных воздушных потоков в зоне разделения; взаимного трения и столкновения частиц между собой и со стенками аппарата, неравномерности распределения скоростей воздушных потоков в камере и т.д.

Отрицательное влияние отмеченных факторов может быть снижено, если создать благоприятные условия движения частиц при переходе из первой фазы во вторую. Для этого полка должна обладать свойствами, позволяющими достичь в переходной точке максимума разности горизонтальных составляющих скоростей движения разделяемых частиц. Положительное влияние на сепарацию оказывает также расслоение компонентов при перемещении по полке. Характер движения частиц данной руды по полке определятся их формой и коэффициентом трения, а так же параметрами полки (углом наклона и материалом покрытия) [1, 2, 3].

Для создания условия, при которых частица витает в потоке воздуха, т.е. будет находиться во взвешенном состоянии, необходимо определить давление воздуха P на частицу, возникающее в результате вращения барабана с лопатками. Для создания непрерывного эффективно действующего потока воздуха, для отделения парусных частиц, согласно теории аэродинамики следует ориентироваться на некую оптимальную густоту решетки лопаток.

Согласно теории аэродинамики осевых вентиляторов оптимальная густота решетки лопаток ($\tau_{опт}$) может быть определена из уравнения [4]:

$$\tau_{опт} = в / t_{опт}, \tag{7}$$

где $в$ – ширина хорды лопатки; м.

Для расчетов используем $\tau_{опт} = 0{,}5$, тогда оптимальный шаг: $t_{опт} = в / \tau_{опт}$.

С учетом этого целесообразное число лопаток БПФС составит:

$$Z = \frac{\pi d}{t_{опт}}, \tag{8}$$

где d – диаметр барабана, м.

Полученное значение Z, округляется до ближайшего меньшего числа.

Для определения давления воздушного потока лопаточного сепаратора может быть использована зависимость [5]

$$P_V = \frac{C_y \rho_C b W^2 Z \cos\beta_2}{2\pi r} \eta_Г, \text{ Па} \tag{9}$$

где Z – число лопаток, ед ; ρ_c – плотность смеси, кг/м^3; cosβ – угол притекания потока, град (const); C_y – коэффициент давления; r – радиус по концам лопа-

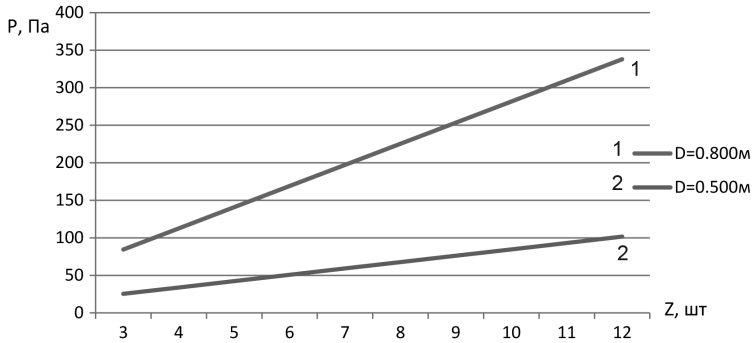

Рис. 3. Зависимость давления создаваемого вращающим барабаном от количества лопаток для разных диаметров.

ток, м; W – скорость притекания потока текучего к лопаткам, м/с; $\eta_г$ – гидравлический кпд БПФС-сепаратора ($\eta_г \leq 0{,}4–0{,}5$)

На рис. 3. приведена расчетная зависимость давления создаваемого вращающим барабаном от количества лопаток для разных диаметров.

Установлено, что для отклонения парусных частиц крупностью класса -40+ +5 мм необходимо иметь непрерывную струю давлением 200 Па, для класса -5+0 мм – 80–100 Па [6].

В этом случае при прохождении материала, частицы, обладающие парусным эффектом, будут отклоняться от первоначального положения в противоположную сторону от струи воздуха создаваемой лопатками вращающегося барабана.

Скорость потока при удалении от поверхности барабана убывает по экспоненциальному закону

$$V_e = \omega \cdot R \cdot e^{-\nu(r\ -R)}, \tag{10}$$

где ν – коэффициент затухания скорости потока; r – расстояние от частицы до центра вращающегося барабана

$$r\ = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}. \tag{11}$$

Обозначим через α угол, определяющей положение подвижной частицы M в сопутствующей системе координат.

Тогда

$$\begin{cases} \sin\alpha = \dfrac{x-a}{r}, \\ \cos\alpha = \dfrac{y-b}{r}. \end{cases} \tag{12}$$

поэтому переносная скорость потока в точке M имеет следующие проекции:

$$\begin{cases} V_{ex} = V_e \cdot \cos\alpha = \dfrac{V_e \cdot (y-b)}{r}, \\ V_{ey} = V_e \cdot \sin\alpha = \dfrac{V_e \cdot (x-a)}{r}. \end{cases} \tag{13}$$

Все эти соображения необходимы для составления дифференциальных уравнений движения частицы разделяемого материала в циркулирующем потоке. С учетом силы сопротивления согласно второму закону Ньютона имеем:

$$m \cdot \vec{a}_M = \vec{G} + \vec{F}_C. \tag{14}$$

Где m – масса частицы, $\vec{a}_M$ – ее ускорение, G – сила тяжести.

Сила сопротивления, определяемая равенством (3), содержит относительную скорость частицы

$$\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_e, \tag{15}$$

где $V = (\dot{x}, \dot{y})$ – абсолютная скорость частицы.

В проекциях на выбранные оси координат получим

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -\mu(\dot{x} - V_{ex}) \\ m\ddot{y} = mg - \mu(\dot{y} - V_{ey}) \end{cases}.$$

Таким образом, после подстановок (13), (10) и (11) получим систему дифференциальных уравнений:

Номер опыта	**Вид покрытия**	**Продукт**	**Выход, %**	**Содержание асбеста, %**	**Извлечение асбеста, %**	**Эффективность, %**
1	2	4	5	6	7	8
Воздушный поток сформирован с торцов барабана и направлен к центру боковой поверхности						
1	Сталь	Концентрат Хвосты Итого	41,5 58,5 100	1,55 0,33 0,82	78,6 21,4 100	37,4
2	Резина	Концентрат Хвосты Итого	38,4 61,6 100	1,63 0,30 0,81	77,2 22,8 100	39,1
3	Асбест	Концентрат Хвосты Итого	24,6 75,4 100	2,45 0,30 0,83	72,7 27,3 100	48,5
4	Асбест	Концентрат Хвосты Итого	25,5 74,5 100	2,42 0,30 0,83	73,4 26,6 100	48,3
5	Асбест	Концентрат Хвосты Итого	29,7 70,3 100	2,12 0,30 0,84	74,9 25,1 100	45,6
6	Асбест	Концентрат Хвосты Итого	33,9 61,1 100	1,89 0,30 0,82	76,4 23,6 100	42,9
Воздушный поток сформирован с помощью сопла и направлен в сторону вращения барабана						
7	Асбест	Концентрат Хвосты Итого	26,1 73,9 100	2,41 0,30 0,85	33,9 26,1 100	48,2

$$\ddot{x} = -\frac{\mu \cdot \dot{x}}{m} + \frac{\mu \cdot \omega \cdot R \cdot (y-b)}{m \cdot \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}} \cdot \exp[-\nu \cdot \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} - R],$$

$$\ddot{y} = g - \frac{\mu \cdot \dot{y}}{m} - \frac{\mu \cdot \omega \cdot R \cdot (x-a)}{m \cdot \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}} \cdot \exp[-\nu \cdot \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} - R], \quad (17)$$

Полученные дифференциальные уравнения нелинейны и неразрешимы в квадратурах. Они поддаются лишь численному интегрированию. Для их решения, возможно, воспользоваться стандартной численной процедурой интегрирования – методом Рунге-Кутта с автоматическим выбором шага по заданной точности.

В таблице приведены результаты разделения асбестосодержащих продуктов (класса -3+0 мм) на БПФС с лопатками.

Приведенные в статье теоретические закономерности были использованы в математической модели БПФС при моделировании процесса движения частицы по зонам разделения.

Математическая модель процесса разделения сыпучих многокомпонентных материалов позволяет всесторонне исследовать процесс разделения частиц с учетом их физических свойств и служит для рассмотрения большого числа вариантов конструкции и оптимизировать режимы работы аппарата, при относительно небольших затратах, не прибегая к изготовлению макетов, опытных образцов.

Использование аэродинамического эффекта в БПФС позволит убрать воздуха подающую систему, обеспечить максимальное извлечение свободного асбестового волокна из руды, сохранить природную длину и текстуру волокна, освободить асбестовое волокно от пыли, а так же случайных посторонних включений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ляпцев С.А., Цыпин Е.Ф, Потапов В.Я., Иванов В.В.* Математическое моделирование разделения частиц в барабанно-полочном фрикционном сепараторе // Известия вузов. Горный журнал. – 1996. – № 7. – С. 147–150.

2. *Келина И.М.,. Цыпин Е.Ф, Александрова Е.П.* О коэффициентах трения минералов при обогащении слюдо содержащих сланцев на полочном воздушном сепараторе // Известия вузов. Горный журнал. – 1983. – № 1. – С. 126–129.

3. *Белов М.А., Дябин Н.В., Копосов Ю.Б. и др.* Практика обогащения асбестовых руд / Под ред. Ф.П. Софронова. – М.: Недра, 1975. – 224 с.

4. *Брусиловский И.В.* Аэродинамика осевых вентиляторов. – М.: Машиностроение. 1984. – 240 с.

5. *Тимухин С.А.* Оптимизация параметров и процессов стационарных машин, Учебное пособие. – Екатеринбург: изд. УГТУ, 2006. – 244 с.

6. *Потапов В.Я., Тимухин С.А., Потапов В.В., Конев Я.И.* Использование аэродинамического эффекта в фрикционных сепараторах для разделении минеральных комплексов обладающих парусностью // Известия вузов. – 2011. – № 25–26. – С. 84–90. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Потапов В.Я. – кандидат технических наук, доцент,
Потапов В.В. – кандидат технических наук, доцент,
Конев Я.И. – аспирант,
Семериков Л.А. – аспирант,
Уральский государственный горный университет, e-mail: 2c1@inbox.ru.

UDC 621.928.622.273, 622.44

SEPARATION OF MINERAL SYSTEM IN TRANSPORT AND AIR STREAM FRICTION SEPARATOR

Potapov V.Ya.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Potapov V.V.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Konev Ya.I.[1], Graduate Student,
Semerikov L.A.[1], Graduate Student,
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, *e*-mail: 2c1@inbox.ru.

Using a fan effect in the friction separators mineral complexes with «sailing». The physical characteristics used for the dressing of asbestos, mica. Different speed of wandering in the air of asbestos fibers from the cells of mica and rock. The formulas for determining the rate of wandering of the particles in the air. Their form depends on the physical characteristics of the shared material and the properties of airstream. The mathematical laws governing the proceeding of particles of minerals in the circulating airstream friction separator. The dependencies of between the pressure of airstream and design parameters of the friction cylinder board separator.

Key words: speed of wandering, «sailing», physical characteristics, friction separator, the fan effect.

REFERENCES

1. Lyaptsev S.A., Tsypin E.F, Potapov V.Ya., Ivanov V.V. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1996, no 7, pp. 147–150.
2. Kelina I.M.,. Tsypin E.F, Aleksandrova E.P. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1983, no 1, pp. 126–129.
3. Belov M.A., Dyabin N.V., Koposov Yu.B. *Praktika obogashcheniya asbestovykh rud*. Pod red. F.P. Sofronova (Asbestos ore beneficiation practice. Sofronov F.P. (Ed.)), Moscow, Nedra, 1975, 224 p.
4. Brusilovskii I.V. *Aerodinamika osevykh ventilyatorov* (Aerodynamics of axial fans), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 240 p.
5. Timukhin S.A. *Optimizatsiya parametrov i protsessov statsionarnykh mashin*, Uchebnoe posobie (Optimization of parameters and processes of fixed machines , Educational aid), Ekaterinburg, izd. UGGU, 2006, 244 p.
6. Potapov V.Ya., Timukhin S.A., Potapov V.V., Konev Ya.I. *Izvestiya vuzov*. 2011, no 25–26, pp. 84–90.

РИСУЕТ НАТАЛЬЯ МОИСЕЕВА

Этого паразита к микроскопу не подпускать на пушечный выстрел