

Дубинин Н.Н., канд. техн. наук, проф.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Туренко А.В., д-р техн. наук, проф.

## К РАСЧЕТУ ГЛИНОРАСТИРАТЕЛЯ

nndubinin@mail.ru

*В статье рассмотрена необходимость определения закона изменения давления в рабочем канале глинорастирателя, среднего давления на поверхность лопасти, силы трения и крутящего момента на основании основного закона движения пластичных глиномасс в рабочих камерах глиноперерабатывающих машин*

**Ключевые слова:** *качество обработки, пластичные глины, рабочий канал, лопасть, процесс, конструкция, механизм.*

Глинорастиратель – машина со сложным воздействием рабочего органа на глиномассу. Пластичная глина в рабочем канале между лопастью и корпусом глинорастирателя перемешивается и диспергируется и одновременно продавливается через отверстия в решетках корпуса.

На производительность, качество обработки и энергозатраты влияет большое число различных параметров, в том числе размеры чаши, диаметр и число отверстий в корпусе, число оборотов крыльчатки, число лопастей и их геометрия, величина минимального зазора между лопастью и чашей.

Основным параметром, от которого зависит производительность глинорастирателя, является давление, возникающее в рабочем канале между лопастью и стенкой корпуса. Давление должно зависеть не только от геометрии рабочего канала, но

и в значительной степени от реологических свойств перерабатываемых пластичных глин.

Процесс обработки глиномассы в глинорастиратель изучен недостаточно, и, практически, отсутствует методика расчета этой машины.

Задачей настоящего расчета является определение закона изменения давления в «рабочем канале» глинорастирателя, среднего давления на лопасть, силы трения на поверхности лопасти, крутящего момента, градиента скорости и некоторых других параметров.

Учитывая большие размеры корпуса машины и незначительный зазор между лопастью и корпусом, задачу можно упростить, считая корпус развернутым на плоскость, относительно которой движется лопасть (рис. 1)

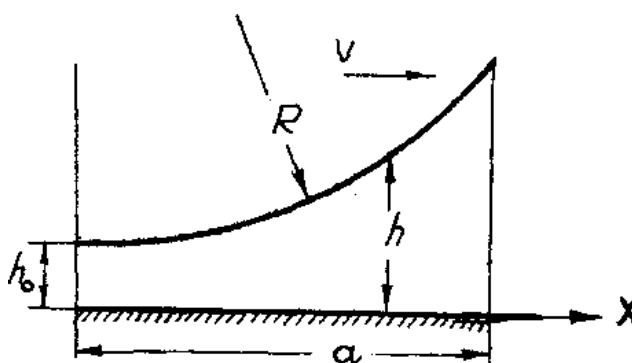


Рис. 1. Расчетная схема глинорастирателя

Граничные условия задачи:

1. На «нижней» плоскости корпуса

$$y = 0, u_x = 0, u_y = 0. \quad (1)$$

2. На поверхности лопасти

$$y = h, u_x = V, u_y = 0.$$

3.  $P = p_0$  при  $x = a$ .

Движение глиняной массы в рабочем канале, образованном протирочной лопастью и перфори-

рованным корпусом глинорастирателя, происходит в направлении, указанном на рис.2. Вследствие этого в исходных уравнениях движения несжимаемой вязкой жидкости [1–4] можно отбросить члены, содержащие  $u_z$  и производные по  $z$ .

Пренебрегая действием массовых сил, при незначительной высоте канала деформации глиномассы ( $F=0$ ), а также считая процесс движения установившимся, т.е.

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0$$

получим систему уравнений Навье Стокса, описывающую плоскопараллельное движение пластичного материала

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} &= \frac{1}{\mu} \cdot \frac{dP}{dy} \\ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Дважды интегрируя уравнение (2), получим

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} y^2 + Ay + B, \\ V_x &= \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} h^2 + Ah. \end{aligned} \quad (3)$$

Откуда

$$A = -\frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} h + \frac{V_x}{h}. \quad (4)$$

Тогда

$$u_x = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} y^2 + \left( \frac{V_x}{h} - \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} h \right) y \quad (5)$$

и, окончательно,

$$u_x = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{dP}{dx} \right) (y^2 - hy) + \frac{V_x y}{h}, \quad (6)$$

$\frac{dP}{dx}$  в уравнении (6) можно найти, воспользовавшись тем фактом, что «расход» материала Q через любое поперечное сечение рабочего канала одинаков:

$$Q = \int_0^h u_x dy = -\frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} \frac{h^3}{6} + \frac{V_x h}{2}$$

и далее

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{12}{h^3} \mu \left( Q - \frac{V_x h}{2} \right) = \frac{6\mu V_x}{h^3} \left( h - \frac{2Q}{V_x} \right) \quad (7)$$

Введем обозначение

$$h_1 = \frac{2Q}{V_x}, \quad (8)$$

тогда окончательно уравнение для градиента давления принимает вид

$$\frac{dP}{dx} = \frac{6\mu V_x}{h^3} (h - h_1). \quad (9)$$

Подставив уравнение (9) в уравнение (6), можно записать

$$u_x = \frac{3V_x}{h^3} (h - h_1)(y^2 - h y) + \frac{V_x y}{h}. \quad (10)$$

$$\frac{dP}{dx} = \frac{dP}{dh} \cdot \frac{dh}{dx}, \quad (11)$$

Так как  $h = h_0 + \frac{x^2}{2R}$  (рис.2).

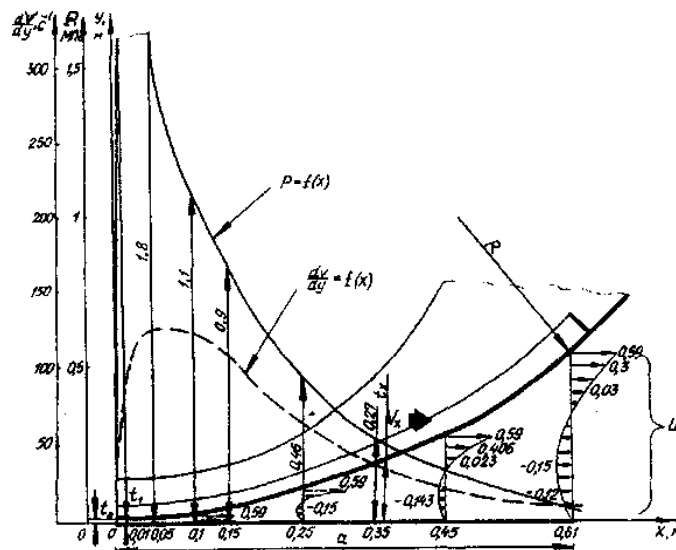


Рис. 2. Графики зависимости давления, градиента скорости, поля скоростей от длины «рабочей» части лопасти при  $V = 0,59 \text{ м/с}$ ;  $\mu = 0,006 \text{ бм}$

Отсюда после дифференцирования получим

$$\frac{dh}{dx} = \frac{x}{2R} \quad (12)$$

и следовательно,

$$\frac{dP}{dx} = \frac{dP}{dh} \cdot \frac{x}{R}, \quad (13)$$

но

Тогда

$$\frac{dP}{dx} = \frac{6\mu V_x}{h^3} (h - h_1).$$

$$\frac{dP}{dx} = \frac{6\mu V_x}{h^3} (h - h_1) \cdot \frac{R}{x}. \quad (14)$$

Воспользовавшись выражением x из (11) можно записать

$$\frac{dP}{dh} = \frac{6\mu V_x R(h-h_1)}{h^3 \sqrt{2R} \sqrt{h-h_0}} \quad (15)$$

$$\int \frac{dP}{dh} = \frac{6\mu V_x R}{\sqrt{2R}} \left( \int \frac{dh}{h^3 \sqrt{h-h_0}} - \int \frac{h_1 dh}{h^3 \sqrt{h-h_0}} \right)$$

Проинтегрируем уравнение(15):

В результате интегрирования получим

$$P = \frac{6\mu V_x R}{\sqrt{2R}} \left\{ \left[ \frac{\sqrt{h-h_0}}{h_0 h} + \frac{1}{2h_0} \left( \frac{2}{\sqrt{h_0}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h-h_0}{h_0}} \right) \right] \times \left( 1 - \frac{3h_1}{4h_0} \right) - \frac{h_1 \sqrt{h-h_0}}{2h_0 h^2} \right\} + b \quad (16)$$

Для нахождения постоянных интегрирования  $b$  и  $h_1$  воспользуемся граничными условиями(1):

Легко видеть, что

$$b = P_0. \quad (18)$$

при  $X = 0; P = P_0; h = h_0;$  (17)

С учётом(18) из уравнения (16) получим после преобразований

при  $X = a \quad P = P_0, h = h_0 + \frac{a^2}{2R}.$

$$h_1 = \frac{\frac{a}{\sqrt{2R} \left( h_0 + \frac{a^2}{2R} \right)} + \frac{1}{\sqrt{h_0}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{2R h_0}}}{\frac{a}{2\sqrt{2R} \left( h_0 + \frac{a^2}{2R} \right)^2} + \frac{3}{4} \left[ \frac{a}{\sqrt{2R \cdot h_0 \left( h_0 + \frac{a^2}{2R} \right)}} + \frac{1}{h_0 \sqrt{h_0}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{2R h_0}} \right]}$$

С учётом постоянных интегрирование уравнение (16) принимает вид

$$P = \frac{6\mu V_x R}{\sqrt{2R}} \left\{ \left[ \frac{\sqrt{h-h_0}}{h_0 h} + \frac{1}{h_0 \sqrt{h_0}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h-h_0}{h_0}} \right] \left( 1 - \frac{3h_1}{4h_0} \right) - \frac{h_1 \sqrt{h-h_0}}{2h_0 h^2} \right\} + P_0. \quad (20)$$

Эксплуатация глинорастирателей с зазорами установленными заводами изготовителями рекомендуются в пределах

$$h_1 \approx 1,33 h_0, \quad (21)$$

что позволяет для инженерных расчетов записать уравнение (20) в простом виде:

$$P = \frac{2\mu V_x \sqrt{2R(h-h_0)}}{h^2} \quad (22)$$

где  $h_1$  для точных расчетов определяется уравнением (19), а  $h$  по формуле (11). Давление на поверхности лопасти в любом сечении позволяет рассчитать формула (22)

Для определения среднего значения давления на криволинейную поверхность рабочей части лопасти, проинтегрируем уравнение (22) по длине рабочей части лопасти в пределах от 0 до  $a$ .

$$\int_0^{x=a} p \cdot dx = \int_0^a \frac{3\mu V_x h_1 b \cdot x dx}{2h_0 \left( h_0 + \frac{x^2}{2R} \right)^2} = \frac{3\mu V_x h_1 b}{2h_0} \times \int_0^a \frac{4R^2 x dx}{\left[ \left( \sqrt{2R h_0} \right)^2 + x^2 \right]^2};$$

после преобразований получим

$$P_{cp} = \frac{3\mu V_x h_1 R a^2 b}{2h_0^2 (2R h_0 + a^2)}. \quad (23)$$

Для определения градиента скорости на поверхности лопасти продифференцируем по высоте канала уравнение (16)

$$\left( \frac{dU}{dy} \right)_{y=h} = \frac{h}{2\mu} \frac{dP}{dx} + \frac{U}{h}. \quad (24)$$

Подставив в уравнение (25) значение  $\frac{dP}{dx}$  из уравнения (19) и проведя преобразования, получим

$$\left( \frac{dU}{dy} \right)_{y=h} = \frac{h}{2\mu} \frac{6\mu V_x}{h^3} (h - h_1) + \frac{V_x}{h} = \frac{4V_x}{h} - \frac{3V_x h_1}{h^2}. \quad (25)$$

Подставляя в уравнение (25) значения  $h$ , получим уравнение для определения градиента скорости в любой точке на поверхности лопасти:

$$\left( \frac{dU}{dy} \right)_{y=h} = \frac{4V_x}{h_0 + \frac{x^2}{2R}} - \frac{3V_x h_1}{\left( h_0 + \frac{x^2}{2R} \right)^2}. \quad (26)$$

Определение среднего значения градиента скорости на поверхности лопасти позволяет выполнить оптимальную геометрическую форму лопасти, связанную с конструкцией корпуса глинорастирателя. Для определения среднего градиента скорости проинтегрируем уравнение (26) по длине рабочей зоны лопасти:

$$\left\langle \frac{dU}{dy} \middle|_{y=h} \right\rangle_{[0,a]} = \frac{4V}{a} \int_0^a \frac{dx}{h_0 + \frac{x^2}{2R}} - \frac{3V h_1}{a} \int_0^a \frac{dx}{\left( h_0 + \frac{x^2}{2R} \right)^2} = \frac{V \cdot R}{2h_0 a} \left( \frac{16h_0 - 6h_1}{\sqrt{2h_0 R}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{2h_0 R}} - \frac{6h_1 a}{2h_0 R + a^2} \right). \quad (27)$$

Проектирование привода глинорастирателя и прочностные расчеты узлов и деталей машины требуют определения силы трения при переработке материала [5–7]. Напряжение сдвига, действующего на лопасть в зоне захвата материала, определяется зависимостью

$$\tau = \mu \left( \frac{dU_x}{dy} \right)_{y=h} \cdot \cos \alpha, \quad (28)$$

где  $\left( \frac{dU_x}{dy} \right)_{y=h} \cdot \cos \alpha$  – проекция градиента скорости на нормаль поверхности лопасти.

Полная величина силы трения, действующей на единицу ширины лопасти, равна

$$F_{\text{тр}} = \frac{\mu V_x R \cdot b}{2h_0} \left( \frac{16h_0 - 6h_1}{\sqrt{2h_0 R}} \arctg \frac{a}{\sqrt{2h_0 R}} - \frac{6h_1 a}{2h_0 R + a^2} \right), \quad (31)$$

где  $b$  – ширина лопасти.

Приведенные в статье расчетные зависимости необходимы при проектировании глиноперерабатывающих машин типа глинорастирателей. Помимо нахождения прочностных характеристик рабочих органов машин полученные зависимости учитывают реологические свойства пластичных глин, отличающихся иногда на порядок и позволяют проектировать машины с оптимальными параметрами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур // Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. 16 с.
2. Дубинин Н.Н. Бесшнековые машины для формования пластичных масс. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. 113 с.
3. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов.: Учеб. пособие для строительных вузов. М: Высшая школа, 1978. 447 с.

$$F_{\text{тр}} = \int_0^{\ell} \mu \left( \frac{dU}{dy} \right)_{y=h} \cdot \cos \alpha \cdot d\ell, \quad (29)$$

где  $\ell$  – длина лопасти в зоне захвата материала.

Но  $\ell \approx a$  и  $d\ell \cdot \cos \alpha = dx$  в области  $0 \leq x \leq a$ ; следовательно,

$$F_{\text{тр}} = \mu \int_0^a \left( \frac{dU_x}{dy} \right)_{y=h} dx. \quad (30)$$

Интегрирование выражения  $(dU/dy)_{y=h}$  было выполнено ранее в (27), окончательно формула для расчёта силы трения материала о лопасть может быть записана в виде

4. Ильина Т.Н., Севостьянов В.С., Шкарпеткин Е.А., Севостьянов М.В. Исследование условий процесса микрогранулирования в дисперсных системах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. №1. С. 81–86.

5. Дубинин Н.Н., Евтушенко Е.И., Немец И.И., Носов О.А., Осокин А.В. Роторные машины для производства стеновых керамических материалов. Rotary Machines for Production of Ceramic Wall Materials / N.N. Dubinin, E. I. Evtushenko, I.I. Nemets, O.A. Nosov, A.V. Osokin // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2014. № 5(5). P. 1710–1718.

6. Дубинин Н.Н., Уральская Л.С., Аналитические исследования движения глиняных масс в рабочих органах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. №4. С. 75–79.

7. Дубинин Н.Н., Михайличенко С.А., Уральская Л.С. Производительность роторных машин с камерой переменного сечения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №4. С. 102–105.

**Dubinin N.N., Turenko A.V.**

### TO CALCULATING THE GLYENER

*The necessity of determining the law of pressure change in the working channel of a clay rubbing machine, the average pressure on the blade surface, the frictional force and the torque based on the basic law of motion of plastic clay mass in working chambers of clay machines*

**Key words:** *processing quality, plastic clays, working channel, blade, process, structure, mechanism.*

**Дубинин Николай Николаевич**, кандидат технических наук, профессор.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

E-mail: nnubinin@mail.ru

**Туренко Арнольд Владимирович**, доктор технических наук, профессор.

Адрес: Московская обл., г. Химки, Юбилейный проспект 47, кв.21