

УДК 621.926.7

*В. С. Севостьянов, А. Е. Качаев, С. А. Михайличенко, Т. Л. Сиваченко, А. А. Фарафонов*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ВОЛОКНИСТОЙ СУСПЕНЗИИ В РАЗГОННОМ УЗЛЕ ДЕЗИНТЕГРАТОРА МОКРОГО ПОМОЛА

UDC 621.926.7

*V. S. Sevostyanov, A. Y. Kachayev, S. A. Mikhailichenko, T. L. Sivachenko, A. A. Farafonov*

## STUDY OF MOVEMENT OF FIBROUS SUSPENSION IN THE DISPERSAL NODE OF A DISINTEGRATOR FOR WET GRINDING

### Аннотация

Армированные волокнами материалы используются в строительстве, а формирование их однородной структуры является важной задачей. Равномерное перемешивание длинных волокон в жидкости, а также организация устойчивого движения такой суспензии в сложных по форме каналах требует разработки аналитических моделей этих процессов. Наиболее актуально исследование закономерностей движения волокнистой суспензии в разгонном узле дезинтегратора.

### Ключевые слова:

волокнистая суспензия, дезинтегратор, двухфазный поток, абсолютная скорость, разгонный узел, мокрый помол.

### Abstract

Materials reinforced by fibers are used in the construction and the formation of their homogeneous structure is an important task. Uniform mixing of long fibers in the liquid and a stable movement of such suspension in the nodes having a complex shape requires the development of analytical models of these processes. The study of the movement of fibrous suspension in the dispersal node of a disintegrator is important and urgent.

### Key words:

fibrous suspension, disintegrator, two-phase flow, absolute speed, dispersal node, wet milling.

Для повышения дисперсности твердой фазы в волокнистых суспензиях используют дезинтеграторы мокрого помола. Однако не все они способны эффективно диспергировать волокна в жидкой среде. Технологически волокна следует обрабатывать в два этапа. На первом этапе в лопастном смесителе осуществляют предварительное перемешивание и распушку волокон. При этом учитывают необходимую концентрацию твердой фазы в жидкости исходя из технологического регламента производства армированных изделий. Затем окончательное диспергирование волокон в жидкой среде производят с помо-

щью роторных агрегатов комплексного гидродинамического воздействия [1]. Сочетание различных видов механического воздействия на волокно в жидкости способствует разрушению стержня волокна как в поперечном, так и в продольном его сечении.

### Основная часть

Известна конструкция дезинтегратора [2, 3], в котором, помимо «сухого» помола, возможен процесс диспергирования волокнистых суспензий. На рис. 1 представлена камера помола дезинтегратора, оснащенная разгонным узлом.

Именно этот узел, трехмерная модель которого приведена на рис. 2, определяет производительность агрегата, его

эффективность на стадии разгона суспензии перед её комплексной гидродинамической обработкой.

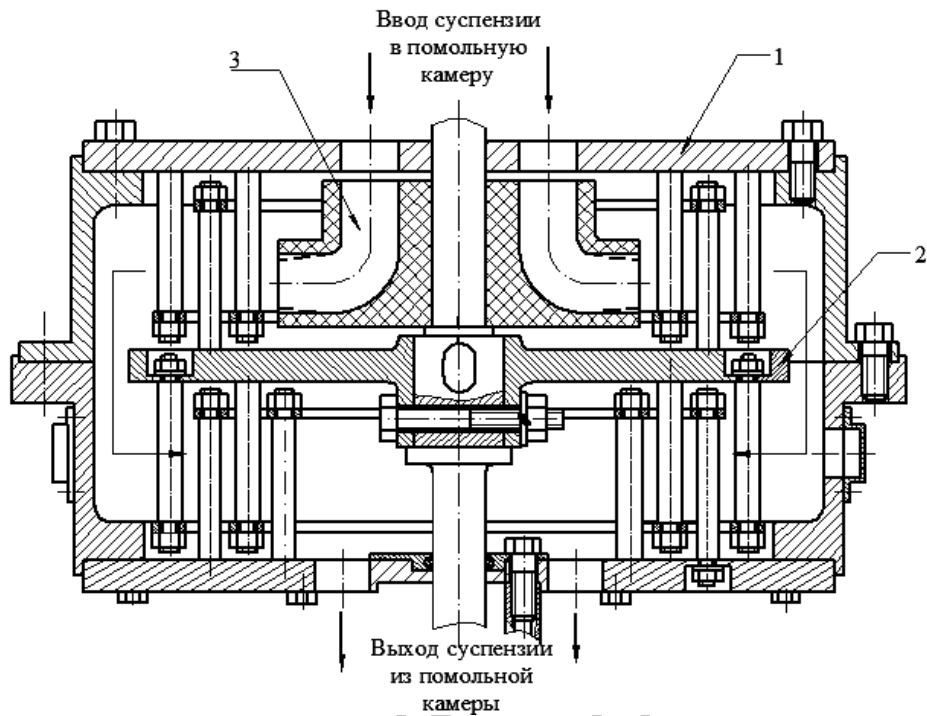


Рис. 1. Конструкция камеры помола дезинтегратора, оснащенная разгонным узлом: 1 – наружный ротор; 2 – внутренний ротор; 3 – разгонный узел

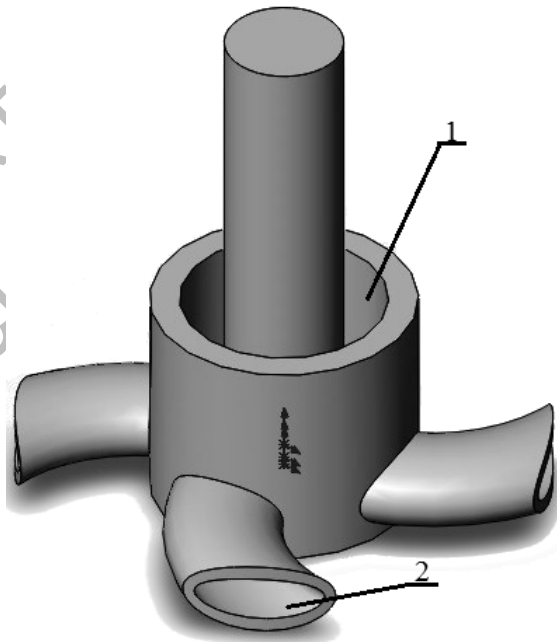


Рис. 2. Трехмерная модель разгонного узла с тороидально-эллиптическими патрубками, установленного на валу внутреннего ротора дезинтегратора: 1 – вращающийся кольцевой канал; 2 – тороидально-эллиптический канал

Геометрические параметры разгонного узла и кинематические свойства волокнистой суспензии связаны основными уравнениями движения вязкой несжимаемой жидкости, которые могут быть объединены в единую математическую модель, позволяющую количественно определить работу разгонного узла. Описание математической модели движения волокнистой суспензии в разгонном узле дезинтегратора мокрого помола заключается в следующем.

Допустим, что вязкая несжимаемая жидкость – волокнистая суспензия – вертикально сверху вниз течет в кольцевом вращающемся канале разгонного узла дезинтегратора, как показано на рис. 1. Предварительно недиспергированные органические волокна в концентрации по объему не более 10 % были смешаны в лопастном смесителе с водой.

В решении задачи рассмотрим стационарное осесимметричное закрученное течение вязкой несжимаемой жидкости, содержащей незначительное по массе количество примеси в виде волокон. Движение суспензии осуществляется в соответствии с рис. 2: на входе в разгонный узел – во вращающемся кольцевом канале постоянного сечения – участок 1; на выходе из разгонного узла – в сужающемся тороидально-эллиптическом канале – участок 2.

Первоначально прямоточное движение волокнистой недиспергированной суспензии, поступающей на вход во вращающийся кольцевой канал на участке загрузки в дезинтегратор, представляет собой автомодельное распределение. Во вращающемся кольцевом канале разгонного узла на это движение накладывается окружное перемещение среды, вызванное центробежными силами. В результате траекториями движения частиц воды и волокон на данном участке являются винтовые линии.

В начале вращающегося кольцевого канала существует участок перестройки первичного движения двухфазного потока. Его длина будет опреде-

ляться отношением интенсивностей конвективного и диффузионного механизмов в переносе окружной скорости. Как только распределение компоненты окружной скорости будет соответствовать закону вращения твердого тела, этот участок закончится. Ввиду относительно небольшого поперечного размера области течения и модельного характера настоящих расчетов участок перестройки движения суспензии в разгонном узле рассматриваться не будет.

Для моделирования процесса течения волокнистой суспензии в вертикальном вращающемся кольцевом канале разгонного узла воспользуемся стационарными уравнениями осесимметричного изотермического дозвукового течения несжимаемой жидкости в центробежном поле, которые на основании осесимметричных уравнений Навье–Стокса для несжимаемой среды можно записать в следующем виде [4]:

$$u \frac{du}{dz} + v \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \nu \cdot \nabla^2 \cdot \mathbf{v}; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u \frac{dv}{dz} + v \frac{dv}{dr} - \frac{w^2}{r} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} + \nu \left( \nabla^2 \cdot \mathbf{v} - \frac{v}{r^2} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u \frac{dw}{dz} + v \frac{dw}{dr} + \frac{v \cdot w^2}{r} = \\ = \nu \left( \nabla^2 w - \frac{w}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

а уравнение неразрывности потока представим как

$$\frac{du}{dz} + \frac{1}{r} \frac{d(v \cdot r)}{dr} = 0, \quad (4)$$

где  $z$ ,  $r$  – цилиндрические координаты;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – осевая, радиальная и окружная скорости потока в выбранной системе координат, м/с;  $\rho$ ,  $p$  – плотность и давление волокнистой суспензии соответ-

венно, кг/м<sup>2</sup>; Па;  $\nabla^2$  – плоский оператор Лапласа,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}. \quad (5)$$

Решим выражения (1)...(4) последовательно, используя метод подстановки и простейшее автомодельное решение задачи (все распределения которого зависят от одной переменной координаты) о закрученном течении вязкой жидкости в кольцевом канале, для чего воспользуемся равенствами:  $u(r) = U(r)$ ,  $v(r) = V(r)$ ,  $w(r) = W(\omega r)$ .

Тогда получим, что давление потока

$$p(z, r) = p_f(z) + \frac{p \cdot \omega^2}{2} (r_2^2 - r_1^2), \quad (6)$$

где  $\omega^2$  – угловая скорость вращения разгонного узла, рад/с;  $p_f(z)$  – линейная функция давления от  $z$ ;  $r_1$  – внутренний радиус кольцевого пространства, равный диаметру вала внутреннего ротора  $r_6$ ;  $r_2$  – внешний радиус кольцевого пространства.

Сила внутреннего трения потока, действующего на  $r_2$  в направлении течения, зависит от осевой скорости потока и равна:

$$\begin{aligned} & 2\pi \cdot h_T \cdot \mu \left[ \left( r_1 \frac{dU(r)}{dr} \right)_{r_1+dr} - \right. \\ & \left. - \left( r_1 \frac{dU(r)}{dr} \right)_{r_1} \right] = \\ & = 2\pi \cdot h_T \cdot \mu \frac{d}{dr} \left( r_1 \frac{dU(r)}{dr} \right) dr, \quad (7) \end{aligned}$$

где  $h_T$  – высота кольцевого канала, м;  $U(r)$  – осевая скорость потока суспензии в канале, м/с;  $dr$  – изменение радиуса, м;  $\mu$  – динамическая вязкость волокнистой суспензии, Па·с.

При стационарном течении двухфазного потока сумма обеих сил обра-

щается в нуль. Поэтому на основании предположений Гогена и закономерностей Пуазеля [4] можно записать следующее уравнение:

$$\frac{d}{dr} \left( r_1 \frac{dU(r)}{dr} \right) = \frac{P_2 - P_1}{h_T \cdot \mu} r, \quad (8)$$

где  $P_2$  – давление суспензии в нижней (конечной) части кольцевого пространства, МПа;  $P_1$  – давление суспензии в верхней (начальной) части кольцевого пространства, МПа.

Решение (8) обращается в нуль при  $r = r_1$  и при  $r = r_2$ , следовательно,

$$\begin{aligned} U(r) = & \frac{P_2 - P_1}{4h_T \mu} \left[ (r_1^2 - r^2) + \right. \\ & \left. + \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

Радиальная составляющая скорости не зависит от координаты  $z$  и прямо пропорциональна координате  $r$ . Тогда из (1) получим

$$V(r) \frac{dV(r)}{dr} - v \cdot \nabla^2 \cdot V(r) = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) в плоскости XY приводится к виду (при условии, что  $\frac{\partial^2}{\partial z^2} = 0$ )

$$V(r) = 2v \cdot \nabla^2 \cdot r. \quad (11)$$

Из уравнения (4) определяем значение окружной скорости потока на радиусе  $r$ :

$$W(r) = \sqrt{U(r) \cdot \omega \cdot r \frac{h_m}{(r_2 - r_1)}}. \quad (12)$$

Из выражения (12) очевидно, что при увеличении высоты кольцевого канала разгонного узла окружная скорость недиспергированной волокнистой сус-

пензии возрастает в связи с повышением закручивания потока. С ростом радиуса от  $r_1$  до  $r_2$  на внутренней стенке канала будет образовываться пленка двухфазного потока. Увеличение окружной скорости потока суспензии прекратится, когда ее значение сравняется со значением окружной скорости самой внутренней стенки разгонного узла. При этом будет наблюдаться прилипание пленки суспензии к внутренней

стенке разгонного узла и процессы транспортирования и придания потоку необходимого ускорения будут нерезультативны. Значит, высота кольцевого канала разгонного узла является важной конструктивной величиной, которая определяет эффективность его работы.

Подставляя в (12) уравнение (9) для определения осевой скорости потока, получим

$$W(r) = \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{4h_T \cdot \mu} \left[ (r_1^2 - r^2) \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) \right]} \cdot \omega \cdot r \frac{h_m}{(r_2 - r_1)} \quad (13)$$

Это означает, что с ростом давления двухфазного потока во вращающемся кольцевом канале увеличивается значение окружной силы: поток интенсивнее закручивается, что подтверждает функциональное значение разгонного узла и позволяет определить рациональные значения его конструктивных параметров на участке 1. В результате

моделирования потока волокнистой суспензии во вращающемся вертикальном кольцевом канале получены эпюры составляющих скоростей потока по трем плоскостям. Профиль скоростей волокнистой суспензии в разгонном узле представлен на рис. 3.

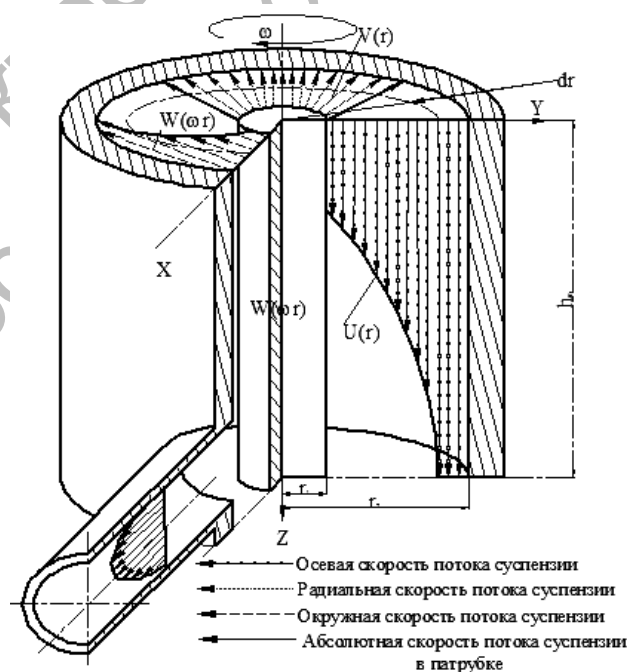


Рис. 3. Эпюры скоростей волокнистой суспензии в разгонном узле дезинтегратора

В потоке суспензии на волокно действует сила сопротивления  $F_s$ , которая пропорциональна первой степени скорости поперечного смещения:

$$F_s = 2 \frac{l}{d_s} m \cdot B_s \cdot \dot{r}, \quad (14)$$

где  $m$  – масса волокна, кг;  $l$  – длина волокна, м;  $d_s$  – диаметр волокна, м;  $\dot{r}$  – поперечная координата волокна в

точке центра тяжести массы,  $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ , м;

$B_s$  – коэффициент сопротивления боковой поверхности волокна во вращающемся потоке [4],

$$B_s = \frac{4\pi \cdot \mu}{l \cdot \ln(7,4Re)}, \quad (15)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса,

$$Re = \frac{\langle v \rangle d_s \cdot \rho}{\mu}, \quad (16)$$

где  $\langle v \rangle$  – абсолютная скорость потока суспензии, м/с, которую можно найти как

$$\langle v \rangle = \sqrt{u^2(r) + v^2(r) + w^2(r)}. \quad (17)$$

Ввиду малой концентрации волокон в жидкой фазе пренебрегаем скольжением отдельно взятых волокон при их перемещении в продольном направлении (по оси OZ). Будем считать, что в этом направлении они движутся со скоростью, равной абсолютной скорости потока, определяемой из выражения (17). Тогда основное уравнение динамики движения волокна в радиальном направлении, где учтены только центробежная сила инерции и сила сопротивления среды, запишется в виде

$$m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} = m \frac{s^2}{r} - 2B_s \frac{dr}{dt}, \quad (18)$$

где  $s$  – центробежная скорость воло-

на, м/с, определяемая согласно выражению

$$s = \omega_s \cdot r, \quad (19)$$

где  $\omega_s$  – угловая скорость вращения ориентированного волокна в кольцевом пространстве, рад/с;  $r$  – произвольный радиус вращения волокна в кольцевом канале, м.

Используя в (18) выражение (19), при этом сокращая (18) на массу волокна, получим

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \omega_s^2 \cdot r - 2B_s \frac{dr}{dt}. \quad (20)$$

Аналитическое решение (20) ищем в виде

$$r = e^{\gamma t}. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (20), получим

$$\gamma^2 \cdot e^{\gamma t} + 2\gamma \cdot e^{\gamma t} - \omega_s^2 \cdot e^{\gamma t} = 0. \quad (22)$$

Алгебраическими корнями уравнения (22) будут действительные числа

$$\gamma_{1,2} = -B \pm \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}. \quad (23)$$

Общее решение уравнения (22) будет представлено следующим распределением:

$$r(t) = C_1 \cdot e^{\gamma_1 t} + C_2 \cdot e^{\gamma_2 t}, \quad (24)$$

где  $C_{1,2}$  – константы интегрирования, определяемые из начальных условий:

$$t = 0; \quad r = r_0; \quad \frac{dr}{dt} = 0.$$

Значит, из (24) при наличии начальных условий следует, что

$$\begin{cases} C_1 \cdot \gamma_1 + C_2 \cdot \gamma_2 = 0; \\ C_1 + C_2 = r_0. \end{cases} \quad (25)$$

Подставляя (24) в (25), определяем постоянные константы интегрирования:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{r_0}{2} \cdot \frac{B_s + \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}}{\sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}}; \\ C_2 = \frac{r_0}{2} \cdot \frac{B_s - \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}}{\sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}}. \end{cases} \quad (26)$$

На основании аналитических исследований (18)...(26) получим уравнение для определения радиальной скорости

$$V_v = \frac{r_0}{2} \left[ \left( B_s - \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2} \right) \cdot \frac{B_s - \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}}{\sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}} e \left( -B_s - \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2} \right) t - \left( B_s + \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2} \right) \cdot \frac{B_s - \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}}{\sqrt{B_s^2 + \omega_s^2}} e \left( -B_s + \sqrt{B_s^2 + \omega_s^2} \right) t \right]. \quad (28)$$

Полученное выражение для определения радиальной скорости движения волокна в жидкой фазе устанавливает зависимость между кинематическими характеристиками суспензии и конструктивно-технологическими параметрами разгонного узла. В связи с увеличением числа *Re* скорости двухфазного потока и волокон в радиальном направлении наблюдается их турбулентное перемешивание, что объясняется выражением (15) при уменьшении коэффициента сопротивления *B<sub>s</sub>* волокна во вращающемся потоке.

На основании конструктивных особенностей разгонного узла и с учетом уравнения (9) для движения вязкой жидкости в вертикальном кольцевом канале можно записать следующее выражение для определения расхода жидкости:

$$Q_y = \frac{\pi \cdot \rho \cdot (P_2 - P_1)}{8\mu \cdot h_T} \times \left[ \left( r_2^4 - r_1^4 \right) - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \right]. \quad (29)$$

сти движения волокна во вращающемся потоке суспензии на любом радиусе кольцевого канала

$$V_v = \gamma_1 \cdot C_1 \cdot e^{\gamma_1 t} + \gamma_2 \cdot C_2 \cdot e^{\gamma_2 t}. \quad (27)$$

После подстановки в (26) всех компонентов уравнения окончательно имеем

Осредненная скорость суспензии в трубе кольцевого сечения

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_0, \quad (30)$$

где *v<sub>0</sub>* – максимальная скорость в середине сечения кольцевого канала, м/с.

Тогда, с учетом (30), выражение (29) примет вид:

$$Q_y = \pi \cdot \rho \cdot \frac{v_0}{2} \left[ \left( r_2^4 - r_1^4 \right) - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \right]. \quad (31)$$

Ввиду того, что значения *r<sub>1</sub>* и *r<sub>2</sub>* – величины одного порядка и незначительно отличаются друг от друга, влиянием центробежной силы на движение суспензии в вертикальной трубе разгонного узла пренебрегаем. Для определения скоростных и расходных параметров движения двухфазного потока в разгонном узле на участке тороидально-эллиптических патрубков учитываем, что

$$Q_y \geq n_y \cdot Q_3, \quad (32)$$

где *Q<sub>y</sub>* – расход суспензии на верти-

кальном кольцевом участке, кг/с;  $n_3$  – количество тороидально-эллиптических патрубков, шт.;  $Q_3$  – расход суспензии через тороидально-эллиптический патрубок, кг/с.

С помощью вероятного метода [5] для определения скорости  $v$  подберем уравнение и коэффициенты в этом решении так, чтобы удовлетворялось граничное условие на стенке трубы  $v = 0$ . Направим координатные оси  $Y$  и  $Z$  вдоль главных нормальных осей поперечного сечения тороидально-эллиптической трубы (см. рис. 3) и получим решение в виде

$$v = A \cdot Y^2 + B \cdot Z^2 + v_0, \quad (33)$$

где  $A$  и  $B$  – геометрические коэффициенты.

Выражению (33) соответствует уравнение

$$2A + 2B = -\frac{P_2 - P_1}{h_T \cdot \mu}. \quad (34)$$

На внутренней поверхности тороидально-эллиптической трубы  $v = 0$ , значит,

$$A \cdot Y^2 + B \cdot Z^2 + v_0 = 0. \quad (35)$$

Приведем (35) к уравнению эллиптического сечения трубы

$$\frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} - 1 = 0. \quad (36)$$

Тогда коэффициенты можно будет представить и вычислить как

$$A = -\frac{v_0}{a^2}; \quad (37)$$

$$B = -\frac{v_0}{b^2}. \quad (38)$$

Решая последовательно уравнения (36)...(38), получаем выражение для определения скорости течения вязкой

жидкости на оси трубы эллиптического сечения

$$v_0 = \frac{P_2 - P_1}{2h_T \cdot \mu} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{a^2 + b^2}. \quad (39)$$

Значит, выражение (39) на основании (36) примет вид:

$$v = v_0 \cdot \left( 1 - \frac{Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} \right). \quad (40)$$

Анализируя (39), можно утверждать, что с уменьшением геометрических параметров  $a$  и  $b$  эллиптического сечения патрубков разгонного узла скорость движения недиспергированной волокнистой суспензии под действием центробежной силы увеличивается, а значит, растет и давление суспензии.

Теперь определяем расход суспензии через трубу эллиптического сечения. Поверхности, на которых скорость  $v$  постоянна, – эллиптические цилиндры:

$$\frac{Y^2}{a'^2} + \frac{Z^2}{b'^2} = 1, \quad (41)$$

полуоси которых определяются соотношениями:

$$a'^2 = a^2 \frac{v_0 - v}{v_0}; \quad b'^2 = b^2 \frac{v_0 - v}{v_0}. \quad (42)$$

Следовательно, расход волокнистой суспензии через один патрубок эллиптического сечения можно найти из выражения

$$\begin{aligned} Q_3 &= \rho \int v \cdot dS = \\ &= -\rho \frac{\pi \cdot a \cdot b}{v_0} \int_{v_0}^0 v \cdot dv. \end{aligned} \quad (43)$$

После интегрирования (43) окончательно имеем

$$Q_3 = \frac{\pi \cdot \rho \cdot a \cdot b}{2} = v_0. \quad (44)$$



Выражение (44) является частным случаем для расчета расхода тороидально-эллиптического патрубка и получено методом интегрирования уравнений движения суспензии внутри разгонного узла дезинтегратора.

Таким образом, получена математическая модель, описывающая движение волокнистой суспензии в разгонном

узле дезинтегратора мокрого помола, а также характер движения суспензии на всех участках разгонного узла в зависимости от его конструктивно-технологических особенностей.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ и Правительства Белгородской области, проект № 14-41-08054 p\_офи\_м.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отходы горнодобывающих предприятий как сырье для производства мелкозернистого бетона, армированного фибрами / А. В. Ключев [и др.] // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2010. – № 4. – С. 81–84.
2. Пат. 2377070 РФ, МПК<sup>7</sup> В 02 С 13/22. Дезинтегратор / А. М. Гридчин, В. С. Севостьянов, Е. С. Глаголев, А. Е. Качаев ; заявитель и патентообладатель Белгород. гос. технолог. ун-т им. В. Г. Шухова. – № 2008118079/03 ; заявл. 06.05.08 ; опубл. 27.12.09, Бюл. № 36. – 9 с.
3. Технологические модули и агрегаты для комплексной переработки природных и техногенных материалов / В. С. Севостьянов, Е. В. Сеница, М. В. Севостьянов, А. В. Уральский, А. Е. Качаев, Д. Н. Перельгин // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика : сб. докл. 66-й Всероссийской науч.-техн. конф. – Самара : Самар. гос. архитектурно-строит. ун-т, 2009. – С. 210–213.
4. Мазо, А. Б. Гидродинамика : учеб. пособие / А. Б. Мазо, К. А. Поташев. – Казань : КГУ, 2008. – 126 с.
5. Ерош, И. Л. Дискретная математика : учеб. пособие / И. Л. Ерош, М. Б. Сергеев, Н. В. Соловьев. – СПб. : СПбГУАП, 2005. – 144 с. : ил.

*Статья сдана в редакцию 18 января 2016 года*

**Владимир Семенович Севостьянов**, д-р техн. наук, проф., Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. E-mail: sevostynov\_00@mail.ru.

**Александр Евгеньевич Качаев**, канд. техн. наук, гл. конструктор, ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель».

**Сергей Анатольевич Михайличенко**, канд. техн. наук, проф., Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. E-mail: prorektor@intbel.ru.

**Татьяна Леонидовна Сиваченко**, соискатель, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. E-mail: tatsianamail.86@gmail.com.

**Александр Александрович Фарафонов**, аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Тел.: +7-4722-36-50-30.

**Vladimir Semenovich Sevostyanov**, DSc (Engineering), Prof., Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. E-mail: sevostynov\_00@mail.ru.

**Aleksandr Yevgenyevich Kachayev**, PhD (Engineering), Chief Designer of ООО Voskresensky «Mashinostroitel» plant.

**Sergey Anatolyevich Mikhailichenko**, PhD (Engineering), Prof., Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. E-mail: prorektor@intbel.ru.

**Tatiana Leonidovna Sivachenko**, соискатель, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. E-mail: tatsianamail.86@gmail.com.

**Aleksandr Aleksandrovich Farafonov**, PhD student, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Phone: +7-4722-36-50-30.