

УДК 621.51

А. С. Галюжин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ВОДЫ В СИЛОВОМ ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-МАГНИТНОГО ВЛАГООТДЕЛИТЕЛЯ

Разработана математическая модель движения частицы воды в винтовом канале центробежно-магнитного влагоотделителя, позволяющая выбрать его основные параметры. Модель учитывает действие центробежной силы, сил Лоренца, тяжести и Кориолиса, а также силы сопротивления движению.

Введение

При движении сжатого воздуха в центробежно-магнитном влагоотделителе на первом этапе необходимо удалить капли воды, а также обеспечить максимальное сосредоточение ее микрочастиц (полимеров) на внешней стороне винтового канала, т. е. ближе к внутренней вертикальной стенке корпуса [1]. Это означает, что поток сжатого воздуха должен пройти некоторый путь по винтовому каналу до воздействия на него ультрафиолетового излучения. На втором этапе после облучения поток сжатого воздуха также некоторое время должен двигаться по винтовому каналу до тех пор, пока ионизированные частицы воды не достигнут вертикальной стенки и не соединятся с тонким слоем воды, образованным ее каплями, ранее достигшими этой стенки.

Для определения необходимой длины пути или времени движения потока сжатого воздуха на первом и втором этапах, а также для оптимизации основных размеров винтового канала необходимо разработать математическую модель движения частицы воды в силовом поле влагоотделителя вместе с потоком сжатого воздуха.

Основная часть

При составлении модели были сделаны следующие допущения:

– частица жидкости есть материальная точка постоянной массы и во время движения принимает обтекаемую форму;

- движение сжатого воздуха в винтовом канале является стационарным;
- воздушный поток находится в диссипативном изотермическом стационарном силовом поле с наличием силового возмущения;
- диссипативность характеризуется суммарной силой сопротивления;
- силовое возмущение характеризуется суммарной вынуждающей силой.

Составим расчетную схему (рис. 1). На рис. 1 $O_a X_a Y_a Z_a$ – базовая (абсолютная) система координат; $OXYZ$ – подвижная система координат, условно скрепленная с воздушным потоком и совершающая вращательное движение с угловой скоростью ω_e и поступательное движение вниз со скоростью V_n . Основное уравнение движения материальной точки (частицы жидкости) с учетом допущений имеет вид [2, с. 237–255]:

$$m \vec{a} = \vec{G} + \vec{F}_y + \vec{F}_l + \vec{F}_k + \vec{F}_c, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; \vec{a} – ускорение частицы воды в подвижной системе координат, м/с²; \vec{G} – сила тяжести, Н; \vec{F}_y – центробежная сила инерции, Н; \vec{F}_l – сила Лоренца, Н; \vec{F}_k – сила Кориолиса, Н; \vec{F}_c – сила сопротивления, Н.

Сила тяжести и центробежная сила инерции определяются по известным формулам:

$$\vec{G} = m \vec{g}, \quad (2)$$

где \vec{g} – ускорение свободного падения, м/с²;

$$\vec{F}_y = -\vec{a}_y m, \quad (3)$$

где \vec{a}_y – центростремительное ускорение, м/с^2 .

Поскольку подвижная система координат совершает вращательное движение с угловой скоростью ω_e , то удобнее модуль центробежной силы инерции представить зависимостью [2, с. 365–369]

$$F_y = m \omega_e^2 r, \quad (4)$$

где ω_e – угловая скорость, характеризующая вращательное движение частицы воды вместе с потоком воздуха, с^{-1} ; r – радиус, равный расстоянию по нормали от оси влагоотделителя до частицы жидкости, м.

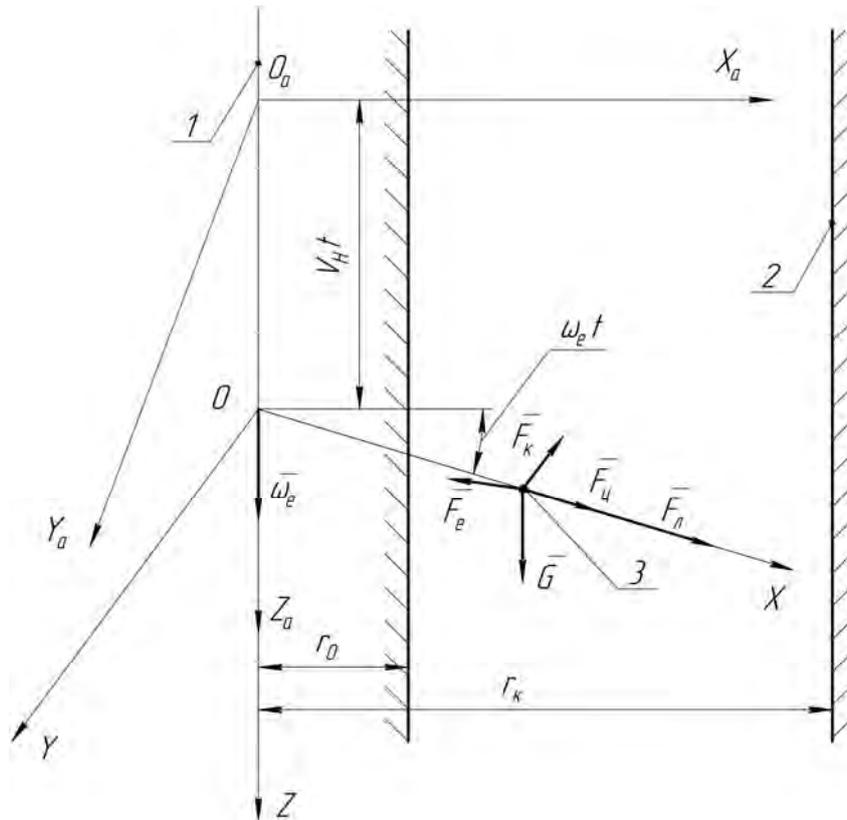


Рис. 1. Схема сил, действующих на заряженную частицу, движущуюся в канале центробежно-магнитного влагоотделителя: 1 – ось влагоотделителя; 2 – вертикальная стенка корпуса; 3 – заряженная частица

Силу Лоренца определим по формуле [3, с. 54–55]

$$\vec{F}_l = q [\vec{V}_0, \vec{B}], \quad (5)$$

где \vec{V}_0 – линейная (окружная) скорость движения частицы, м/с ; \vec{B} – индукция магнитного поля, Тл; q – электрический заряд, Кл.

Модуль силы Лоренца также представим зависимостью от ω_e

$$F_l = q \omega_e r B. \quad (6)$$

Когда частица жидкости под воздействием F_y и F_l начинает двигаться относительно потока воздуха, то возникает сила Кориолиса, которая определяется зависимостью [4, с. 200–204]

$$\vec{F}_k = 2m [\vec{\omega}_e \vec{V}_r], \quad (7)$$

где \vec{V}_r – скорость движения частицы воды относительно потока воздуха, м/с .

Если размеры частицы жидкости на несколько порядков больше размеров молекул воздуха (назовем ее макрочастицей воды), то для определения силы F_c используют теорию аэродинамики. В этом случае физическая сущность силы сопротивления F_c представляет собой суммарное сопротивление при обтекании макрочастицы потоком воздуха. Для определения данной силы используют формулу, структура которой была предложена Ньютоном [5, с. 255–257; 6, с. 133–136]. Тогда

$$\vec{F}_c = -0,5k_c S_c \rho_{сж} |\vec{V}_r| \vec{V}_r, \quad (8)$$

где k_c – коэффициент лобового сопротивления; S_c – площадь проекции макрочастицы воды на плоскость, перпендикулярную вектору V_r , м²; $\rho_{сж}$ – плотность сжатого воздуха, кг/м³.

Подставим значения сил из уравнений (2)...(8) в уравнение (1) и спроецируем полученное уравнение на оси XYZ. При этом сделаем допущение, что составляющие \dot{y} и \dot{z} относительной скорости движения частицы относительно потока воздуха пренебрежительно малы по сравнению с составляющей \dot{x} . Поэтому при расчете F_l и F_k учитываем только \dot{x} . Тогда система дифференциальных уравнений движения макрочастицы в винтовом канале влагоотделителя при $x \geq r_0 \geq 0$ и $\dot{x} \geq 0$ примет вид:

$$\begin{cases} m \ddot{x} = m \omega_e^2 x + q \omega_e B x - 0,5k_c S_c \rho_{сж} \dot{x}^2; \\ m \ddot{y} = -2m \omega_e \dot{x} - 0,5k_c S_c \rho_{сж} \dot{y}^2; \\ m \ddot{z} = m g - 0,5k_c S_c \rho_{сж} \dot{z}^2 \end{cases} \quad (9)$$

или

$$\begin{cases} \ddot{x} = (\omega_e^2 + q \omega_e B / m) x - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{x}^2; \\ \ddot{y} = -2\omega_e \dot{x} - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{y}^2; \\ \ddot{z} = g - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{z}^2. \end{cases} \quad (10)$$

Для удобства решения системы (10) обозначим:

$$A_1 = \omega_e^2 + q \omega_e B / m;$$

$$A_2 = 0,5k_c S_c \rho_{сж} / m; \quad B_1 = 2\omega_e. \quad (11)$$

Тогда система (10) примет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = A_1 x - A_2 \dot{x}^2; \\ \ddot{y} = -B_1 \dot{x} - A_2 \dot{y}^2; \\ \ddot{z} = g - A_2 \dot{z}^2. \end{cases} \quad (12)$$

С помощью замены $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}_1$, $y_1 = y$, $y_2 = \dot{y}_1$, $z_1 = z$, $z_2 = \dot{z}_1$ в общем случае система (12) сводится к системе дифференциальных уравнений Риккати первого порядка вида

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = A_1 x_1 - A_2 x_2^2; \\ \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = -B_1 x_2 - A_2 y_2^2; \\ \dot{z}_1 = z_2; \\ \dot{z}_2 = g - A_2 z_2^2. \end{cases} \quad (13)$$

Известно, что дифференциальное уравнение Риккати интегрируется в квадратурах только в частных случаях, а системы дифференциальных уравнений Риккати могут быть решены исключительно численными методами. В данном случае система (13) записана в виде, удобном для применения метода Рунге-Кутты, который реализован во множестве пакетов символьной математики [7, 8].

Вместе с тем два последних уравнения системы (13) не содержат переменные x и y и могут быть решены методом разделения переменных. Запишем эти уравнения:

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = g - A_2 z_2^2; \\ \dot{z}_1 = z_2. \end{cases} \quad (14)$$

Первое уравнение системы (14) является уравнением Риккати. Для его интегрирования проведем разделение переменных:

$$\frac{dz_2}{dt} = g - A_2 z_2^2 \qquad \dot{z} = \frac{1}{a} \frac{1 + e^{bt}}{C e^{bt} - 1}. \quad (17)$$

или

$$\frac{dz_2}{g - A_2 z_2^2} = dt;$$

$$\frac{1}{g} \sqrt{\frac{g}{A_2}} \frac{d\left(\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2\right)}{1 - \left(\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2\right)^2} = dt.$$

Проинтегрируем последнее уравнение и получим

$$\frac{1}{2\sqrt{g A_2}} \ln \left| \frac{\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2 + 1}{\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2 - 1} \right| = t + \ln C_1. \quad (15)$$

Выполним дальнейшие преобразования уравнения (13):

$$\left| \frac{\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2 + 1}{\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2 - 1} \right| = C e^{2t\sqrt{g A_2}}. \quad (16)$$

Обозначим $a = \sqrt{\frac{A_2}{g}}$ и $b = 2\sqrt{g A_2}$.

Тогда

$$\frac{a z_2 + 1}{a z_2 - 1} = C e^{bt},$$

а

$$a z_2 + 1 = a z_2 C e^{at} - C e^{at}$$

или

$$z_2 (a - a C e^{bt}) = -(1 + C e^{bt}).$$

Определим z_2 из последнего выражения:

$$z_2 = \frac{1}{a} \frac{1 + e^{bt}}{C e^{bt} - 1}.$$

Поскольку $\dot{z} = z_2$, то получим дифференциальное уравнение первого порядка

Проинтегрируем уравнение (17):

$$z = \frac{1}{a} \int dt + \frac{2}{aC} \int \frac{dt}{e^{bt} - \frac{1}{C}}. \quad (18)$$

Обозначим $u = e^{bt} - 1/C$. Тогда $e^{bt} = u + 1/C$, а $bt = \ln|u + 1/C|$ или $t = \ln|u + 1/C|$.

Соответственно $dt = \frac{1}{b\left(u + \frac{1}{C}\right)} du$.

Подставим данное значение dt в уравнение (18):

$$z = \frac{1}{a} t + \frac{2}{aC} \int \frac{du}{bu(u + 1/C)} =$$

$$= \frac{t}{a} + \frac{2}{ab} \ln \frac{u}{u + 1/C} + C_2. \quad (19)$$

Вернемся к первоначальным переменным, подставив вместо u его значение:

$$z = \frac{2}{ab} \ln \left| e^{bt} - \frac{1}{C} \right| - \frac{t}{a} + C_2. \quad (20)$$

Вместо a и b подставим их значения. В результате получим

$$z = \frac{1}{A_2} \ln \left| e^{2\sqrt{A_2 g} t} - \frac{1}{C} \right| - \frac{t}{\sqrt{A_2/g}} + C_2. \quad (21)$$

Окончательно подставим в (21) значение A_2 из (11). В результате получим следующую зависимость:

$$z = \frac{2m}{k_c S_c \rho_{сж}} \ln \left| e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} - \frac{1}{C} \right| -$$

$$- \frac{t}{\sqrt{k_c S_c \rho_{сж} / 2mg}} + C_2. \quad (22)$$

Найдем постоянные интегрирования C и C_2 . Для нахождения постоянной C продифференцируем уравнение (22). В

результате получим

$$\dot{z} = \frac{1}{A_2} \frac{1}{e^{2\sqrt{A_2}g t} - 1/C} \times e^{2\sqrt{A_2}g t} 2\sqrt{A_2 g} - \frac{1}{\sqrt{A_2/g}}. \quad (23)$$

Начальным моментом времени ($t = 0$) считаем момент вхождения частицы воды в винтовой канал влагоотделителя. При этом $z = 0$, следовательно допускаем, что $\dot{z} = 0$. Тогда уравнение (23) примет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{A_2/g}} = \frac{1}{A_2} \frac{2\sqrt{A_2 g}}{1-1/C}.$$

Умножим обе части последнего уравнения на $\sqrt{A_2}$. В результате получим $C = -1$.

Постоянную интегрирования C_2 определим из уравнения (22) при упомянутых выше начальных условиях:

$$C_2 = -\frac{2m \ln 2}{k_c S_c \rho_{сж}} = \frac{1,386m}{k_c S_c \rho_{сж}}. \quad (24)$$

Окончательно, с учетом зависимости (24) и $C = -1$, уравнение (22) примет вид:

$$z = \frac{2m}{k_c S_c \rho_{сж}} \ln \left| e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} + 1 \right| - \frac{t}{\sqrt{k_c S_c \rho_{сж} / 2m g}} - \frac{1,386m}{k_c S_c \rho_{сж}}. \quad (25)$$

Подставим в (23) значения A_2 из (11) и C_2 из (24). В результате получим

$$\dot{z} = \frac{2m e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} \sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m}}{k_c S_c \rho_{сж} (e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} + 1)} - \frac{1}{\sqrt{k_c S_c \rho_{сж} / 2m g}}. \quad (26)$$

Упростим уравнение (26). Тогда

$$\dot{z} = \sqrt{\frac{2m g}{k_c S_c \rho_{сж}}} \left(\frac{2e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t}}{e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} + 1} - 1 \right). \quad (27)$$

Как отмечалось выше, при движении потока влажного воздуха в винтовом канале влагоотделителя можно выделить два этапа:

- 1) движение по винтовому каналу до облучения;
- 2) движение после облучения.

На первом этапе происходит удаление макрочастиц воды из потока воздуха под действием центробежной силы инерции, на втором этапе – удаление микрочастиц (полимеров) воды под действием центробежной силы и силы Лоренца.

Рассмотрим *первый этап*. При движении частицы воды вместе с потоком воздуха в винтовом канале влагоотделителя до облучения сила Лоренца равна нулю, т. к. частица является электрически нейтральной. В этом случае система дифференциальных уравнений (9) примет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega_e^2 x - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{x}^2; \\ \ddot{y} = -2\omega_e \dot{x} - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{y}^2; \\ \ddot{z} = g - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{z}^2. \end{cases} \quad (28)$$

Два первых уравнения системы (28) могут быть решены численными методами, решение третьего уравнения соответствует зависимости (25).

В конце первого этапа движения происходит облучение потока воздуха ультрафиолетовым излучением. К этому моменту макрочастицы воды должны достичь вертикальной стенки корпуса влагоотделителя, а в потоке воздуха остаться только микрочастицы воды. После облучения частицы воды приобретут положительный заряд и при вхождении в магнитное поле на них начнет действовать сила Лоренца.

На *втором этапе* движения потока влажного воздуха размеры частиц воды сопоставимы с размерами молекул возду-

ха, поэтому использовать уравнение (8) для расчета силы сопротивления F_c не представляется возможным. Проанализируем силу F_c с точки зрения основ молекулярно-кинетической теории газов. При разработке молекулярно-кинетической теории газов принято допущение, что при хаотическом движении молекул воздуха число взаимных столкновений между молекулами пренебрежительно мало по сравнению с числом ударов о стенки сосуда (в данном случае о стенки влагоотделителя). Хаотическое движение молекул заменено движением вдоль декартовых осей координат, причем в любой момент времени вдоль каждой из осей движется 1/3 часть всех молекул таким образом, что одна половина (1/6 часть) этих молекул движется в одну сторону, а вторая половина – в противоположную [9, с. 68–70; 10, с. 19–22]. Тогда, например, при движении частицы воды вдоль оси X число лобовых столкновений с молекулами воздуха и число попутных столкновений будет одинаково и, соответственно, количество движения частицы воды будет неизменным. Такие же выводы можно сделать при рассмотрении движения частицы воды вдоль осей Y и Z. При таких допущениях силой сопротивления можно пренебречь.

Тогда дифференциальные уравнения движения частицы воды после облучения будут следующими:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (\omega_e^2 + q\omega_e B/m)x; \\ \ddot{y} = -2\omega_e \dot{x}; \\ \ddot{z} = g. \end{cases} \quad (29)$$

Как отмечалось в [1], сила Лоренца как минимум в 200 раз больше центробежной силы. При таких условиях центробежной силой можно пренебречь. Тогда дифференциальные уравнения (29) будут иметь вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m}q\omega_e Bx; \\ \ddot{y} = -2\omega_e \dot{x}; \\ \ddot{z} = g. \end{cases} \quad (30)$$

Первое уравнение системы (30) не содержит переменные z и y , является дифференциальным уравнением второго порядка и может быть решено методом характеристического уравнения. Обозначим

$$A_3 = q B / m. \quad (31)$$

Тогда

$$\ddot{x} - A_3 \omega_e x = 0. \quad (32)$$

Составим характеристическое уравнение

$$p^2 - A_3 \omega_e = 0,$$

где p – переменная характеристического уравнения; $p = \pm \sqrt{A_3 \omega_e}$.

Для действительных корней характеристического уравнения получим

$$x = C_3 e^{\sqrt{A_3 \omega_e} t} + C_4 e^{-\sqrt{A_3 \omega_e} t}. \quad (33)$$

Определим постоянные интегрирования из начальных условий: при $t_0 = 0$, $x_0 = r_0$ (r_0 – внутренний радиус винтовой канавки влагоотделителя (см. рис. 1)). Подставив данные значения в (33), получим

$$x_0 = C_3 + C_4. \quad (34)$$

Продифференцируем уравнение (33):

$$\begin{aligned} \dot{x} = & C_3 e^{\sqrt{A_3 \omega_e} t} \sqrt{A_3 \omega_e} - \\ & - C_4 e^{-\sqrt{A_3 \omega_e} t} \sqrt{A_3 \omega_e}. \end{aligned} \quad (35)$$

При $t_0 = 0$ $\dot{x}_0 = 0$. Подставим эти значения в (33) и получим

$$C_3 - C_4 = 0. \quad (36)$$

Решим совместно (34) и (36). В результате получим

$$C_3 = C_4 = x_0 / 2 = r_0 / 2. \quad (37)$$

С учетом (31) и (37) уравнения (33) и (35) примут вид:

$$x = 0,5 r_0 \left(e^{\sqrt{q B \omega_e / m} t} + e^{-\sqrt{q B \omega_e / m} t} \right); \quad (38)$$

$$\dot{x} = 0,5 r_0 \left(e^{\sqrt{q B \omega_e / m} t} - e^{-\sqrt{q B \omega_e / m} t} \right) \times \sqrt{q B \omega_e / m}. \quad (39)$$

Для определения количества оборотов винтового канала целесообразно иметь зависимость $t = f(x)$, поскольку, зная время движения частицы воды до вертикальной стенки влагоотделителя, можно рассчитать длину пути движения потока воздуха в винтовом канале. Для этого решим уравнение (38) относительно t .

Обозначим $\alpha = e^{\sqrt{q B \omega_e / m} t}$. Тогда уравнение (38) примет вид:

$$x = \frac{r_0(\alpha^2 + 1)}{2\alpha} \quad \text{или} \quad r_0 \alpha^2 - 2x\alpha + 1 = 0.$$

Решение данного квадратного уравнения известно:

$$\alpha_{1,2} = \frac{x \pm \sqrt{x^2 - r_0^2}}{r_0}.$$

Подставим значение α в последнее уравнение и определим t :

$$t = \frac{1}{\sqrt{q B \omega_e / m}} \ln \frac{x \pm \sqrt{x^2 - r_0^2}}{r_0}.$$

Выражение $\ln \frac{x - \sqrt{x^2 - r_0^2}}{r_0}$ при $x \geq r_0$ будет величиной отрицательной, тогда $t < 0$, что невозможно. Поэтому уравнение для расчета времени движения частицы воды вдоль оси X будет иметь вид:

$$t = \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{q B \omega_e}} \ln \frac{x + \sqrt{x^2 - r_0^2}}{r_0}. \quad (40)$$

Разработанная математическая модель позволяет сформулировать следующую методику выбора основных параметров влагоотделителя. Вначале, исходя из конструкции пневмопривода с учетом габаритных и присоединительных размеров, выбираем размеры r_0 и r_k (см. рис. 1). Затем выбираем площадь живого сечения винтового канала S_k и угол наклона винтового канала γ к линии, перпендикулярной оси влагоотделителя. На первом этапе можно допустить, что бы S_k была примерно равна площади живого сечения трубопровода, соединяющего компрессор с влагоотделителем. Экспериментально установлено, что $\gamma = 6...8^\circ$. При этом вертикальный габаритный размер влагоотделителя существенно не увеличивается, обеспечивается поступательное движение потока воздуха вниз со скоростью V_n и сила Лоренца F_l остается достаточно большой, поскольку угол между вектором F_l и вектором окружной скорости V_o частицы воды меньше прямого угла всего на $6...8^\circ$ [1]. После этого определяем среднюю скорость движения воздуха V_{cp} в винтовом канале и угловую скорость ω_e :

$$V_{cp} = Q / S_k, \quad (41)$$

где Q – подача компрессора или расход воздуха в пневмолинии, $\text{м}^3/\text{с}$;

$$\omega_e = 2V_{cp} \sin \gamma / (r_0 + r_k). \quad (42)$$

Затем решаем два первых уравнения системы (26) численными методами при условии, что $r_k \geq x \geq r_0$, а $y \geq 0$, и находим время t_1 движения макрочастицы воды различной массы от вертикальной стенки винтового канала 4 до вертикальной стенки корпуса 2 влагоотделителя (см. рис. 1). При этом форму макрочастицы воды считаем сферической, а ее массу определяем по формуле

$$m = \rho_в \frac{4}{3} \pi R_ч^3, \quad (43)$$

где $\rho_в$ – плотность воды, кг/м³; $R_ч$ – радиус макрочастицы воды, м.

Поскольку форму макрочастицы воды считаем сферической, то площадь проекции макрочастицы воды S_c на плоскость, перпендикулярную вектору V_r , определим как площадь круга:

$$S_c = \pi R_ч^2. \quad (44)$$

Для принятой формы макрочастицы воды коэффициент лобового сопротивления k_c можно принять исходя из [5, с. 257–260]: $k_c = 0,62$. Для определения плотности сжатого воздуха $\rho_{сж}$ целесообразно использовать известное уравнение Клапейрона

$$\rho_{сж} = p_{а сж} / (R_g T_{сж}), \quad (45)$$

где $p_{а сж}$ – абсолютное давление сжатого воздуха, Па; R_g – газовая постоянная воздуха, $R_g = 287$ Дж/(кг·К) [11, с. 21]; $T_{сж}$ – абсолютная температура сжатого воздуха, К.

Для дальнейших расчетов выбираем максимальное значение t_1 . Затем определяем угол φ_1 , на который повернется подвижная система координат OXYZ, условно скрепленная с воздушным потоком:

$$\varphi_1 = \omega_e t_1. \quad (46)$$

Количество витков винтового канала влагоотделителя n_1 до облучения воздушного потока определяем следующим образом:

$$n_1 = \varphi_1 / 2\pi. \quad (47)$$

Высоту винтового канала определяем с помощью зависимости (25), подставив в нее полученное значение t_1 .

На втором этапе после облучения воздушного потока происходит удаление микрочастиц воды, которые в результате облучения получают положительный за-

ряд. При этом с помощью уравнения (40) при условии, что $r_k \geq x \geq r_0$, а $y \geq 0$, находим время t_2 движения микрочастицы воды различной массы от вертикальной стенки винтового канала 4 до вертикальной стенки корпуса 2 влагоотделителя (см. рис. 1). Расчеты выполняем для наихудших условий, считая, что микрочастица воды получила минимальный положительный заряд, т. е. в результате облучения выбит один электрон – $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл [12, с. 10]. Индукцию магнитного поля B определяем с помощью методики, изложенной в [1]. Массу микрочастицы определяем исходя из того, что масса молекулы воды составляет $2,993 \cdot 10^{-26}$ кг [12, с. 10], а микрочастица воды может содержать до миллиона молекул. В качестве дальнейшего расчетного выбираем наибольшее значение t_2 . Затем с помощью зависимостей (46) и (47) определяем количество витков винтового канала влагоотделителя n_2 после облучения воздушного потока.

Заключение

Таким образом, разработанная математическая модель центробежно-магнитного влагоотделителя позволяет выбрать его основные параметры: размеры винтового канала и количество витков канала до и после облучения потока сжатого воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галюжин, А. С. Осушка сжатого воздуха с помощью магнитного поля / А. С. Галюжин // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 126–134.
2. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики : учеб. пособие в 2 т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – СПб. : Лань, 1998. – Т. 1. – 736 с.
3. Никитин, Н. Н. Курс теоретической механики : учебник для студентов вузов / Н. Н. Никитин. – М. : Высш. шк., 1990. – 607 с.

4. **Арцимович, Л. А.** Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях / Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов. – М. : Наука, 1978. – 224 с.

5. **Альтшуль, А. Д.** Гидравлика и аэродинамика : учебник для студентов вузов / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – М. : Стройиздат, 1987. – 414 с.

6. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы : учебник для машиностроительных вузов Т. Башта [и др.]. – 2-е изд. перераб. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

7. **Кириянов, Д. В.** Самоучитель MATHCAD / Д. В. Кириянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.

8. **Охорзин, В. А.** Прикладная математика

в системе MATHCAD : учеб. пособие / В. А. Охорзин. – 3-е изд. – СПб. : Лань, 2009. – 352 с.

9. **Трофимова, Т. Н.** Курс физики : учебник для студентов вузов / Т. Н. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1985. – 432 с.

10. **Кикоин, А. К.** Молекулярная физика : учеб. пособие / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин. – М. : Наука, 1976. – 480 с.

11. Справочное пособие по гидравлике, гидромашин и гидроприводам / Я. М. Вильнер [и др.] ; под общ. ред. Б. Б. Некрасова. – Минск : Выш. шк., 1985. – 382 с.

12. **Радциг, А. А.** Параметры атомов и атомных ионов : справочник / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 16.03.2011

A. S. Galiyzhin
Mathematical model of movement of a particle of water in a field of force of the centrifugal-and-magnetic moisture separator

The mathematical model of movement of a particle of water in the screw channel of the centrifugal-and-magnetic moisture separator which makes it possible to choose its key parameters has been developed. The model considers the action of centrifugal force, Lorentz forces, gravity and Coriolis force as well as running resistance force.