

УДК 62-47:533.2(045)

**Левданский И.А., Волк А.М.***УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь***ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПЕРФОРИРОВАННОМ ЭЛЕМЕНТЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИХРЕВОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА**

**Аннотация.** Предлагаемый способ удаления влаги с поверхности частиц крупнозернистого материала заключается в придании частицам вращательного движения с высокой угловой скоростью в вертикальном перфорированном элементе нисходящим вихревым потоком. За счет центробежной силы, возникающей при вращении частиц, будет происходить срыв влаги с поверхности, которая будет уноситься из зоны разделения воздушным потоком. Разработана методика расчета аппарата для газоцентричного обезвоживания влажных материалов.

**Ключевые слова:** обезвоживание, крупные полидисперсные частицы, вихревой поток, перфорированный элемент, скорость газового потока.

**Levdansky I.A., Volk A.M.***Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***MOVEMENT OF SOLID PARTICLES IN A PERFORATED ELEMENT UNDER THE INFLUENCE OF A VORTEX GAS FLOW**

**Abstract.** The proposed method for removing moisture from the surface of coarse-grained material particles is to give the particles a rotational motion with a high angular velocity in a vertical perforated element with a downward eddy current. Due to the centrifugal force created by the rotation of the particles, moisture is destroyed from the surface and transported by air flows from the separation zone. A method for calculating a device for gas-centric dewatering of wet materials has been developed.

**Keywords:** dewatering, large polydisperse particles, vortex flow, perforated element, gas flow rate.

**Введение.** Процесс сушки, заключающийся в удалении влаги из твердых и пастообразных материалов путем ее испарения, широко распространен в различных отраслях промышленности, например, в химической, пищевой. Зачастую процесс сушки является заключительной стадией технологического процесса. Ввиду того, что испарение влаги достаточно энергоемкий процесс, то предварительно влагу стараются удалить более дешевыми способами, например, в центрифугах, фильтрах, а затем удалить оставшуюся влагу сушкой. При этом тепло затрачивается не только на испарение влаги, но и на нагрев материала и потери в окружающую среду, что делает стоимость сушки достаточно высокой.

**Основная часть.** Известны работы [1-3], где рассматриваются вопросы удаления влаги с поверхности материала не сушкой, а путем обдува частиц скоростным воздушным потоком, что позволяет значительно снизить расход энергии на процесс обезвоживания. Нами разработан новый более эффективный способ, при котором удаление влаги с поверхности частиц осуществляется в вертикальном перфорированном элементе нисходящим вихревым газовым потоком [4]. При использовании предлагаемого способа удаление влаги с поверхности частиц будет осуществляться за счет многих факторов. Рассмотрим эти факторы по мере их осуществления при движении частиц в перфорированных элементах. При подаче влажного материала в центр элемента частицы за счет воздействия вихревого газового потока будут с большим ускорением двигаться к

стенке элемента. Так как газовый поток в элементе имеет высокий градиент скорости, то воздействие его на частицы приведет к вращению их вокруг своей оси. Угловая скорость вращения может достигать больших значений, измеряемых тысячами оборотов в минуту [5]. За счет центробежной силы, возникающей при вращении частиц, будет происходить срыв влаги с поверхности. Так как в большинстве случаев частицы материала являются полидисперсными, то они в газовом потоке будут двигаться с различной скоростью, что приведет к массовому их соударению. Естественно, при соударении частиц за счет резкого торможения влага будет срываться с поверхности частиц. Далее частицы, двигаясь в радиальном направлении, приобретают высокую скорость и ударяются о перфорированную стенку элемента. Естественно, и здесь при ударе будет наблюдаться срыв влаги с поверхности частиц.

В ряде работ [5-7] как теоретически, так и экспериментально показано, что частица, достигнув стенки элемента, будет двигаться вниз, скатываясь по перфорированной поверхности, или будет наблюдаться скачкообразное движение. Многие исследователи отмечают, что скачкообразное движение наблюдается при достижении высоких скоростей газового потока. При скачкообразном движении частиц за счет многократных ударов, обтирания об стенку и обдува высокоскоростным газовым потоком также будет происходить удаление влаги с поверхности частиц.

Таким образом, в предлагаемом способе практически по всей траектории движения частицы будет происходить удаление поверхностной влаги.

Чтобы определить эффективность удаления влаги с поверхности частиц при осуществлении данного способа были проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования. Для определения скорости частиц, движущихся в перфорированном элементе под воздействием вихревого газового потока, запишем в цилиндрической системе координат уравнения их движения [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_a \left( \frac{dV_z}{dt} - \frac{V_\varphi^2}{r} \right) = F_r - F_{\Pi}; \\ m_a \left( \frac{dV_\varphi}{dt} + 2 \frac{V_\varphi V_r}{r} \right) = F_\varphi - F_{\text{ТР}}^\varphi; \\ m_a \frac{dV_z}{dt} = m_a g + F_z + F_{\text{ТР}}^z - F_A; \\ I_a \frac{d\omega_\varphi}{dt} = M_{\text{ТР}}^\varphi + M_\tau^\varphi; \\ I_a \frac{d\omega_z}{dt} = M_{\text{ТР}}^z + M_\tau^z, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $m_a$  – масса частицы, кг;

$V$  – скорость движения частицы, м/с;

$V_\varphi, V_r, V_z$  – тангенциальная, радиальная и осевая составляющие скорости частицы, м/с;

$t$  – время, с;

$F_r, F_\varphi, F_z$  – составляющие силы гидродинамического воздействия, Н;

$F_{\Pi}$  – подъемная сила, Н;

$F_{\text{ТР}}$  – сила трения, Н;

$F_A$  – сила Архимеда, Н;

$g$  – ускорение свободного падения; м/с<sup>2</sup>;

$I_a$  – момент инерции частицы, кг·м<sup>2</sup>;

$\omega$  – угловая скорость,  $c^{-1}$ ;

$M$  – момент количества движения (момент импульса),  $m^2 \cdot \text{кг}/c$ ;

$M_{\text{тр}}$  – момент силы трения,  $\text{Н}/\text{м}$ ;

$M_{\tau}$  – вращающий момент на поверхности частицы,  $\text{Н}/\text{м}$ .

Схема действующих сил представлена на рисунках 1, 2. Рассматриваем случай контакта частицы с проницаемой поверхностью.

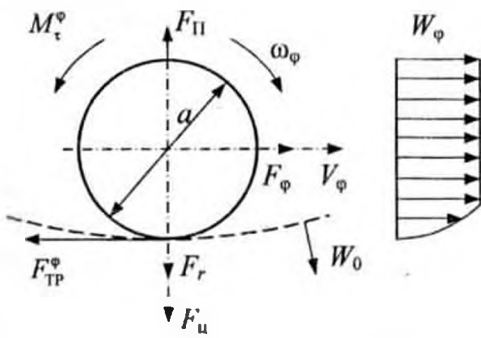


Рисунок 1. – Касательные составляющие действующих на частицу сил

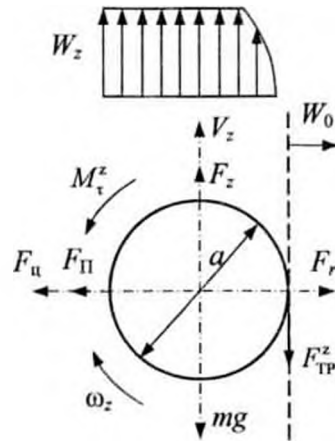


Рисунок 2. – Нормальные составляющие действующих на частицу сил

При расчетах принимаем, что частица имеет сферическую форму диаметром  $a$ , плотностью  $\rho_a$  и массой  $m_a$ . Центробежную силу обозначим как  $F_u$  [Н], а скорость прохождения двухфазного потока через отверстия перфорации  $W_0$  [м/с].

Методика расчета величины сил, входящих в систему уравнений (1), подробно изложена в литературе [8, 9], и при решении данной системы уравнений воспользуемся этими зависимостями. Однако, для расчета некоторых сил – подъемной силы, состоящей из сил Магнуса и Архимеда, сил гидродинамического воздействия и других – необходимо иметь математические зависимости для расчета профилей осевой  $W_z$  и касательной  $W_\phi$  составляющих скорости закрученного газового потока в проницаемом цилиндре, а также для определения давления, создаваемого закрученным газовым потоком, действующим на стенку перфорированного цилиндра.

Профили осевой и касательной скоростей вихревого газового потока определялись на основании экспериментальных исследований, которые были проведены нами на опытной установке по методике, изложенной в работе [10]. Одновременно на этой установке проводился замер давления на стенку, создаваемого закрученным газовым потоком. Результаты экспериментальных исследований были обработаны и представлены в виде математических зависимостей. Но прежде чем рассматривать результаты экспериментальных исследований, рассмотрим уравнения Навье-Стокса и неразрывности в цилиндрической системе координат [11]. Для осесимметричных потоков принимаем  $\frac{dW}{d\phi} = 0$ . При движении закрученных газовых потоков даже с частичным оттоком газа через отверстия перфорации радиальная составляющая газового потока  $W_r$  незначительна и поэтому в расчетах не учитывается. Также в случае с газовым потоком не учитываем силу тяжести. Тогда из уравнения неразрывности следует  $\frac{dW}{dz} = 0$ . Следовательно, профиль осевой скорости не изменяется по длине.

Проведенные исследования показали, что профили тангенциальной и осевой скоростей газа изменяются по радиусу элемента по сложной кривой, имеющей характерный максимум. За тангенциальной улиткой в центре элемента возникает зона обратных токов. Исследуемые профили скоростей сохраняют подобие для элементов 50-200 мм, при скоростях газа 10-40 м/с. По длине элемента профили скорости изменяются незначительно. Например, на расстоянии от улитки, равном  $8R$ , максимальное значение тангенциальной скорости уменьшилось на 8 %.

Обработка опытных данных по значению тангенциальной и осевой скоростей газового потока проводилась в безразмерном виде:

$$\overline{W}_\varphi = \frac{W_\varphi}{W_{cp}}; \quad (2)$$

$$\overline{W}_z = \frac{W_z}{W_{cp}}, \quad (3)$$

где  $W_{cp}$  – средняя расходная скорость газового потока в элементе, радиус которого так же приводился к безразмерному виду:

$$\overline{r} = \frac{r}{R}, \quad (4)$$

где  $r$  – текущий радиус;

$R$  – радиус элемента.

Аппроксимация опытных данных на ЭВМ позволила получить уравнения для тангенциальной и осевой скоростей в виде полиномов третьей степени:

$$\overline{W}_\varphi = \frac{W_\varphi}{W_{cp}} = -4,0162 \left(\frac{r}{R}\right)^3 - 2,3641 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 6,3847 \frac{r}{R} + 0,086; \quad (5)$$

$$\overline{W}_z = \frac{W_z}{W_{cp}} = -10,671 \left(\frac{r}{R}\right)^3 + 11,819 \left(\frac{r}{R}\right)^2 - 1,1347 \frac{r}{R} + 0,0383. \quad (6)$$

Замеры давления воздуха на стенку внутри фильтровального элемента производились в четырех точках перфорированного патрубка с помощью дифференциальных манометров. Для присоединения дифференциальных манометров к фильтровальному элементу по его высоте с шагом в 100 мм были предусмотрены технологические отверстия диаметром 3 мм с ниппелями, при помощи которых резиновые шланги соединяли дифференциальные манометры с установкой.

Обработка опытных данных показала, что основное влияние на величину давления газового потока на стенку оказывает среднерасходная скорость газового потока. Снижение давления по длине элемента незначительно, так как не превышает семи процентов. В результате обработки опытных данных получена следующая зависимость для расчета давления вихревого потока  $\Delta P$  на стенку элемента:

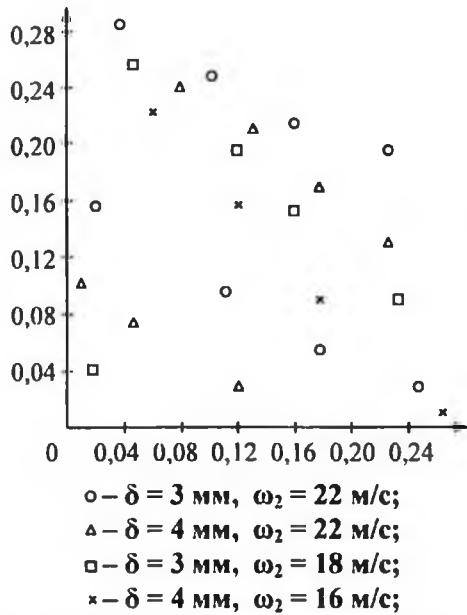
$$\Delta P = \xi \rho_\Gamma W^2 = 2,2 \rho_\Gamma W^2, \quad (7)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидродинамического сопротивления;

$\rho_\Gamma$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$W$  – скорость газового потока, м/с.

Кроме исследования профиля скоростей газового потока, а также его давления на стенку на опытной установке проводились исследования по определению условий, при которых частицы в перфорированном элементе будут двигаться вдоль стенки скачками. Для этого в вертикальный фильтровальный элемент через тангенциальную улит-



$\delta$  – диаметр следа;  $\omega_2$  – скорость воздуха  
 Рисунок 3. – Развертка фильтровального элемента со следами частиц

ку сверху подавался газовый поток, а по центру также сверху подавались одиночные шарообразные частицы, диаметром 3-4 мм, изготовленные из восковых цветных мелков. Средняя скорость газа изменялась от 10 до 30 м/с. После каждого опыта установка частично разбиралась, а фильтровальный элемент разворачивался, и по оставшимся на стенке следам определялась траектория частиц.

На рисунке 3 представлена развертка фильтровального элемента, со следами частиц. Во всех опытах на внутренней поверхности элемента обнаруживали следы частиц в виде отдельных точек с расстоянием между ними 50-90 мм. Таким образом, экспериментальные исследования показывают, что в фильтровальном элементе частицы могут двигаться скачками, однако, для этого нужно создать необходимые условия,

а именно, необходимо поддерживать высокую скорость газового потока, высокую начальную скорость частиц  $\vartheta_{нач}$  и т.д. По наличию следов частиц на фильтровальной поверхности элемента определялась критическая скорость газа  $\omega_{кр}$  в элементе, когда частицы газа начнут двигаться по пористой поверхности скачками. На рисунке 4 приведен график, где показано как изменяется критическая скорость газа в зависимости от диаметра частиц  $a$ . Из графика видно, что для частиц диаметром 1 мм критическая скорость равна 12 м/с, а для частиц диаметром 4 мм она увеличивается до 18 м/с. Начальная скорость частиц также влияет на критическую скорость газа, и чем она выше, тем выше и критическая скорость, что хорошо видно из графика на рисунке 5.

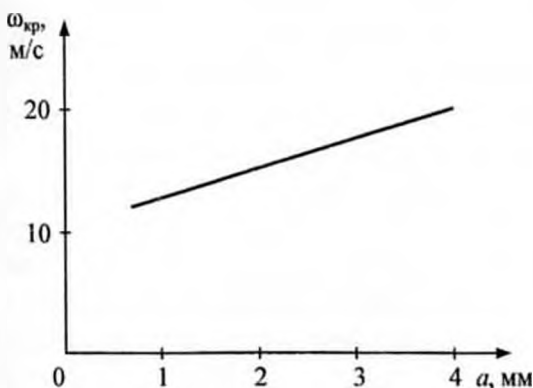


Рисунок 4. – Влияние диаметра частиц на критическую скорость газа при  $\vartheta_{нач} = 2$  м/с

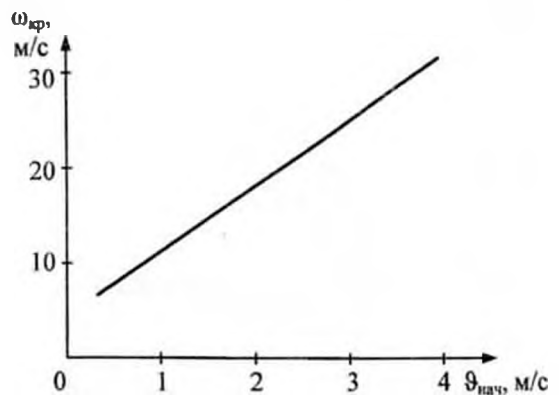


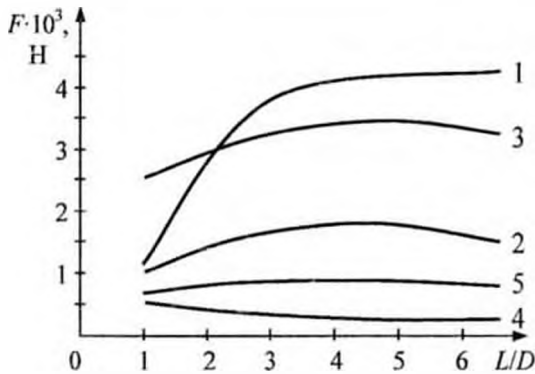
Рисунок 5. – Влияние начальной скорости частиц на критическую скорость газа при  $a = 2$  мм

Предложенная система дифференциальных уравнений (1), описывающая движение сферической частицы в перфорированном элементе, и анализ действующих на нее сил позволяют рассчитать ее траекторию в вихревых потоках [8]. Составленная система уравнений не имеет аналитического решения, но ее численное интегрирование с помощью стандартных программ не вызывает особых затруднений.

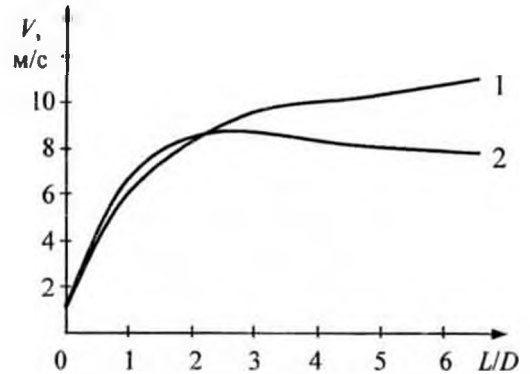
Прежде всего, нами рассчитывались силы, воздействующие на частицу, и их изменения по длине элемента. Результаты этих расчетов представлены на рисунке 6.

Из графиков видно, что центробежная и подъемные силы являются преобладающими. Поэтому одиночная частица движется по винтовой траектории и периодически контактирует с проницаемой поверхностью стенки элемента.

Далее определялись осевая и касательные составляющие скорости частиц по длине элемента, и эти результаты представлены на рисунке 7.

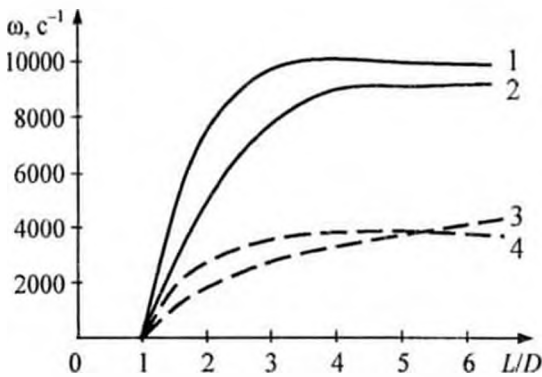


1 – подъемная сила; 2 – сила трения; 3 – центробежная сила; 4, 5 – осевая и касательная составляющие силы гидродинамического воздействия  
Рисунок 6. – Изменение по длине перфорированного элемента сил воздействия  $F$  на частицу диаметром  $a = 2$  мм ( $\bar{W}_z = 20$  м/с;  $D = 0,1$  м;  $\alpha = 35^\circ$ ;  $\bar{f}_z = 0,16$ )



1 – осевая составляющая скорости частицы; 2 – касательная составляющая скорости частицы  
Рисунок 7. – Изменение осевой и касательной составляющих скоростей частицы по длине элемента ( $\bar{W}_z = 20$  м/с;  $\rho_a = 950$  кг/м<sup>3</sup>;  $D = 0,1$  м;  $\bar{f}_z = 0,16$ )

На рисунках 6, 7:  $L$  – длина фильтровального элемента, м;  $D$  – диаметр фильтровального элемента, м;  $\alpha$  – параметр крутки газового потока (угол наклона лопаток завихрителя);  $\bar{f}_z$  – относительная площадь отверстий проницаемой поверхности.



1, 3 – касательные составляющие (расчетные); 2, 4 – осевые составляющие ( $\omega = V/a$ ); 1, 2 – диаметр частиц полистирола  $a = 2$  мм; 3, 4 –  $a = 4$  мм  
Рисунок 8. – Изменение угловой скорости вращения частиц полистирола по длине перфорированного элемента ( $\rho_a = 1150$  кг/м<sup>3</sup>;  $\bar{W}_z = 20$  м/с;  $D = 0,1$  м)

Из графиков видно, что осевая составляющая  $W_z$  практически остается постоянной по длине, а касательная начинает падать, то есть крутка снижается.

Очень важным фактором для расчета процесса удаления поверхностной влаги с частиц является скорость вращения самих частиц относительно собственной оси. Поэтому определение изменений угловой скорости вращения частиц по длине элемента является следующей задачей. Результаты решения этой задачи представлены на графике рисунка 8.

Из графиков видно, что на расстоянии  $L/D = 3$  скорость вращения частиц достигает своего максимума и далее остается постоянной.

Толщина слоя жидкости, находящейся на поверхности вращающейся час-

тицы, уравнивается, с одной стороны, поверхностным натяжением, а, с другой стороны, центробежной силой, на основании этого можно записать следующее уравнение:

$$\frac{\sigma}{a} = \frac{\rho_a \delta_a \omega_a^2}{\sin \theta}, \quad (8)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

$\omega_a$  – угловая скорость частицы,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\theta$  – угловая координата цилиндрической системы координат, град.

Из уравнения (8) можно получить формулу для расчета толщины пленки жидкости  $\delta_a$ , оставшейся на частице:

$$\delta_a = \frac{\sigma \sin \theta}{\rho_a \omega_a^2 a^2}. \quad (9)$$

Если проинтегрировать уравнение (9) можно определить массу жидкости, находящейся на поверхности частицы:

$$m_6 = \int_0^\pi 2\pi \sin \theta \rho_a \delta_a a d\theta = \int_0^\pi \frac{2\pi\sigma}{\omega_a^2} \sin^2 \theta d\theta = \frac{\pi^2 \sigma}{\omega_a^2}. \quad (10)$$

Тогда влажность частицы составит:

$$\psi = \frac{m_6}{m_a} 100 \% = \frac{3}{4} \frac{\pi \sigma}{\rho_a V_a^2} 100 \%. \quad (11)$$

Последняя формула показывает, что влажность после аппарата не зависит от плотности жидкой фазы, а в значительной степени определяется гидродинамическими характеристиками движения частицы в аппарате.

**Заключение.** На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета аппарата для газочентробежного обезвоживания влажных материалов. С помощью данного аппарата можно значительно снизить энергетические затраты на сушку крупнозернистых материалов или вообще отказаться от процесса сушки.

#### Список использованных источников

1. Кваша, В.Б. Срыв влаги с поверхности частиц в инжекторном слое / В.Б. Кваша, В.В. Чижов, В.Г. Айнштейн // Инженерно-технический журнал. – 1976. – № 3. – С. 411-415.
2. Сорока, Е.И. Разработка комбинированного способа сушки, основанного на дезагрегации дисперсных материалов и механическом уносе влаги с целью экономии топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Е.И. Сорока; ВНИИ металлург. теплотех. – Свердловск, 1990. – 25 с.
3. Филипов, В.А. Технология сушки и термоаэроклассификации углей / В.А. Филипов. – М.: Недра, 1980. – 287 с.
4. Способ удаления влаги с поверхности частиц крупнозернистого материала: пат. 20508 Респ. Беларусь, МПК В01D12/00 / Э.И. Левданский, И.А. Левданский; заявитель УО «Белорусский государственный технологический университет». – № а20130201; заявл. 15.02.13; опубл. 30.10.16 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 5. – С. 78.

5. Бабуха, Г.Л. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках / Г.Л. Бабуха, А.А. Шрайбер. – Киев: Наукова думка, 1972. – 175 с.
6. Соловьев, М.И. К вопросу взвешивания и транспортирования зернистого материала в горизонтальном трубопроводе / М.И. Соловьев // Инженерно-физический журнал. – 1964. – № 10. – С. 62-66.
7. Грачев, Ю.Г. Исследование процесса отрыва твердых частиц от поверхности под воздействием потока воздуха / Ю.Г. Грачев, В.К. Хеннер, А.И. Гришков // Вопросы совершенствования строительства. – 1973. – № 124. – С. 151-156.
8. Волк, А.М. Анализ сил, действующих на твердую частицу в сплошном потоке / А.М. Волк, Е.В. Терешко // Труды БГТУ. – 2015. – № 6 (179). – С. 10-14.
9. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред: в 2 частях / Р.И. Нигматулин. – М: Наука, Гл. редакция физ.-мат. лит., 1987. – Ч. 1. – 464 с.
10. Ершов, А.И. Разработка, исследование и применение элементных ступеней контакта с взаимодействием фаз в закрученном прямотоке: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / А.И. Ершов. – Ленинград, 1975. – 304 л.
11. Гольдштик, М.А. Вихревые потоки: монография / М.А. Гольдштик. – Новосибирск: Наука, 1981. – 365 с.

#### Информация об авторах

#### Information about the authors

*Левданский Иван Александрович* – магистр технических наук, аспирант УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: piahp@belstu.by.

*Levdansky Ivan Alexandrovich* – Master (Engineering), Post-graduate Student, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: piahp@belstu.by.

*Волк Анатолий Матвеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшей математики», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: volk@belstu.by.

*Volk Anatoly Matveyevich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of “Higher mathematics”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: volk@belstu.by.

Поступила в редакцию 04.05.2020 г.