

Keywords: trough-type swath sorting, movable aprons, auger intensifier, auger speed, disc speed, apron speed, material feed, screening efficiency, gravel.

REFERENCES

1. Kondratiev A.V. Intensifikatsiya protsessa razdeleniya sypuchikh materialov na valkovykh separatorakh: monografiya [Intensification of the process of separation of bulk materials on roll separators: monograph]. Tver: TvGTU, 2012. 95 p.
2. Abdullah A.K. Substantiation of the design and parameters of the roller screen for sorting complexes of road-building machines. Cand. Author. Diss. (Engineering). Tver. 2014. 19 p.
3. Patent RF 2317864 *Ustroystvo dlya grokhocheniya sypuchikh materialov* [Device for screening bulk materials]. Kondratiev A.V., Gruzdev S.V., Kochkanyan S.M., Pavlov Yu.N., Semin A.V. Declared 12.09.2006. Published 27.02.2008, Bulletin No 6.
4. Patent RF 126632. *Ustroystvo dlya sortirovki sypuchikh materialov* [A device for sorting bulk materials]. Kondratiev A.V., Kochkanyan S.M., Perkhurov A.I., Rusinkevich V.A., Veresov M.I. Declared 29.10.2012. Published 10.04.2013, Bulletin No 10.
5. Rusinkevich V.A., Kochkanyan S.M., Kondratiev A.V. Efficiency of gravel screening depending on the parameters of the roll trough-like sorting with a screw intensifier *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2014. No 5, pp. 188–192. (In Russian).
6. Kondratiev A.V., Pavlov Yu.N., Perkhurov A.I., Renkus T.I. The results of the study of the process of screening gravel on a trough-shaped roll screen with an active intensifier. *Stroitelnyye i dorozhnyye mashiny*. 2015. No 10, pp. 58–60. (In Russian).
7. Kondratiev A.V., Kochkanyan S.M., Renkus T.I., Veresov M.I., Korneev E.A. The results of comparative studies of the use of active intensifiers on a trough-shaped roll sorting. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2016. No 3 (54), pp. 39–45. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 11.05.2022; после рецензирования/revised: 10.06.2022;
принята/accepted: 15.06.2022

УДК 622.331.002.5

АНАЛИЗ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЧАСТИЦУ ФРЕЗЕРНОГО ТОРФА В ЗОНЕ ВСАСЫВАЮЩЕГО ФАКЕЛА ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, Д.М. ЩЕРБАКОВА, аспирант

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Щербакова Д.М., 2022

Эффективность всасывания фрезерной крошки пневматическими торфоуборочными машинами во многом определяется скоростью воздушного потока, создаваемого пневмосистемой. Попытки аналитического определения данной скорости

предпринимались рядом исследователей не только для торфа, но и в смежных отраслях, а именно при изучении и оптимизации процессов обеспыливания и пневмотранспорта древесных опилок. Однако, в силу специфики торфяной фрезерной крошки, тема не утратила своей актуальности. В ходе исследования было установлено, что на отрыв торфяной частицы от подстилающей поверхности влияет не сила Магнуса, как предполагалось ранее, а подъемная сила, вызванная разницей давлений над и под частицей. Разработаны математические модели, позволяющие рассчитать минимальную скорость воздушного потока, необходимую для страгивания торфяной частицы с места и отрыва ее от подстилающей поверхности.

Ключевые слова: торф, пневмоуборочная машина, всасывающее сопло, скорость воздушного потока, лобовая сила, подъемная сила, сила Магнуса, уравнение Бернулли.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-57-71

ВВЕДЕНИЕ

Анализ силового воздействия воздушного и жидкостного потоков на частицы различных материалов производился многими учеными [1–5]. Однако в связи с тем, что фрезерный торф имеет свою ярко выраженную специфику, в представляемой статье продолжено обсуждение данной темы. Обоснованный подход к этому вопросу позволит аналитически определить скорость воздушного потока в зоне действия всасывающего факела, необходимую для страгивания торфяной частицы с места и отрыва ее от подстилающей поверхности торфяной залежи.

Для упрощения задачи рассмотрим неподвижную частицу торфа шарообразной формы, лежащую на подстилающей поверхности торфяной залежи и находящуюся в зоне действия всасывающего факела сопла пневмоуборочной машины. Теоретически на частицу в таком положении может оказывать влияние ряд сил: тяжести F_T , адгезии $F_{ад}$, сцепления $F_{сц}$ (вызвана воздействием на частицу окружающих частиц и подстилающей поверхности), трения $F_{тр}$, лобового давления F_L (обусловлена воздействием на частицу воздушного потока), подъемная F_P (вызывающая отрыв частицы от подстилающей поверхности).

Рассмотрим каждую из этих сил и проанализируем механизм их появления и действия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Начало координат совместим с центром неподвижной частицы. Ось Ox направим в сторону движения воздушного потока и последующего поступательного движения частицы. Ось Oz направим вверх – в сторону последующего отрыва частицы от подстилающей поверхности торфяной залежи (рис. 1).

Сила тяжести неотделима от частицы и действует независимо от присутствия (отсутствия) всасывающего факела воздушного потока. Для частиц шарообразной формы сила тяжести находится из уравнения

$$F_T = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; r – радиус частицы, м; ρ_T – плотность торфяной частицы, кг/м^3 .

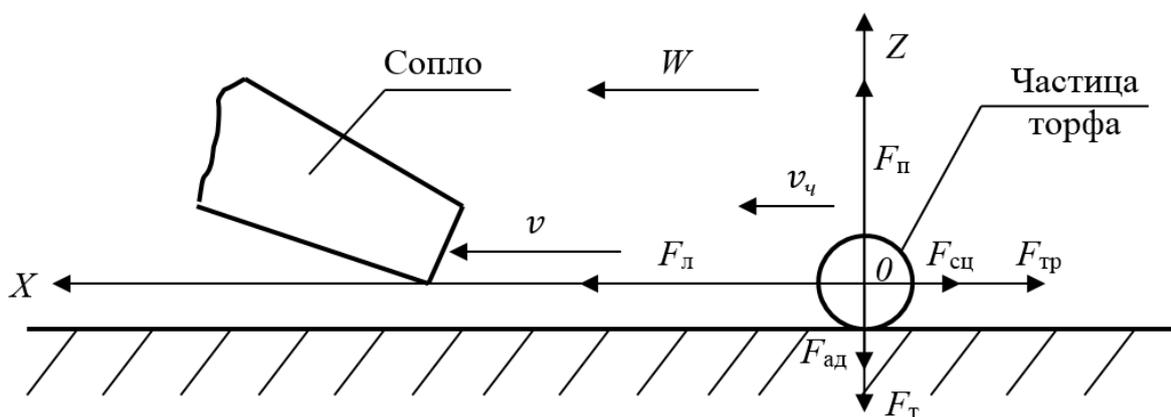


Рис. 1. Расчетная схема к анализу сил, действующих на частицу в момент ее нахождения в зоне действия всасывающего факела: $v_{ч}$ – скорость частицы; v – скорость воздушного потока; W – поступательная скорость движения пневмоуборочной машины

Сила адгезии в работах [1, 5] определяется по формуле

$$F_{ад} = \frac{h\omega}{8\pi z^2} r,$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; ω – угловая скорость вращения частицы, c^{-1} ; z – расстояние от частицы до ограничивающей поверхности, м.

В работе [2] сила адгезии вообще не учитывается. Ее природа заключается в возникновении вокруг частицы некоторого поверхностного слоя (пленки) и последующем межмолекулярном взаимодействии в поверхностном слое [6]. По сути, адгезия есть прилипание. Такому случаю идеально соответствовали бы частицы торфа непосредственно во влажной торфяной залежи. Однако частицы фрезерного торфа, достигшие кондиционной уборочной влажности (40–45 %), можно лишь с очень большим допущением считать покрытыми влажным поверхностным слоем.

Теория Б.В. Дерягина основана на предположении, что сила адгезии является функцией толщины зазора h между частицами или между частицей и подстилающей поверхностью. Для случая взаимодействия твердых частиц между собой формула для силы адгезии имеет вид [7]:

$$F_{адч} = 2\pi \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \cdot (2\sigma_1 - \sigma_2),$$

где r_1 и r_2 – радиусы шарообразных частиц, м (в нашем случае $r = r_1 = r_2$); σ_1 и σ_2 – поверхностное натяжение на границе фаз 1 и 2 (в нашем случае $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \approx 0,08$ Н/м [7]).

Таким образом, для взаимодействия одинаковых частиц сила адгезии может быть определена по формуле

$$F_{адч} = \pi r \sigma.$$

Для случая взаимодействия твердых частиц с плоской подстилающей поверхностью сила адгезии имеет вид [7]:

$$F_{адп} = 4\pi r\sigma.$$

Следовательно, суммарная сила адгезии вычисляется по формуле

$$F_{ад} = F_{адч} + F_{адп} = 5\pi r\sigma.$$

Однако с учетом того, что подстилающая поверхность также представляет собой совокупность множества частиц, адгезию с подстилающей поверхностью можно не учитывать. Тогда

$$F_{ад} = \pi r\sigma.$$

По нашему мнению, смысл сил сопротивления, возникающих между частицами и подстилающей поверхностью, более глубоко отражает понятие сцепления. Причем речь здесь идет не о «структурном» сцеплении, которое присутствует при сдвигающих напряжениях в монолите торфа, а о «восстанавливаемом» сцеплении, вызванном шероховатостями поверхностей соприкасающихся частиц торфа [8]. В таком случае сила сцепления, вызванная воздействием на частицу окружающих частиц и подстилающей поверхности, может быть найдена по формуле

$$F_{сц} = cS_{сц},$$

где c – сцепление, Па; $S_{сц}$ – площадь сцепления, м² (для шарообразной частицы $S_{сц} \approx \frac{1}{2}4\pi r^2$).

Сцепление для торфа нарушенной структуры можно определить по формуле [9]:

$$c = 1,132 - \frac{0,08W_{п}}{100} + 0,0038 \left(\frac{W_{п}}{100}\right)^2,$$

где $W_{п}$ – полная влагоемкость, зависящая от вида торфяной залежи.

Например, для верхового торфа степень разложения $R = 5-10\%$ $W_{п} = 1500\%$, а для низинного с $R = 35-40\%$ $W_{п} = 700\%$ [10]. Для этих условий сцепление c составляет 0,787 Па для верхового и 0,758 Па для низинного торфа.

Сила трения обусловлена трением покоя между частицей и окружающими поверхностями. Согласно рис. 1 она может быть найдена по формуле

$$F_{тр} = f(F_{т} + F_{ад} - F_{п}),$$

где f – коэффициент трения частиц фрезерного торфа по подстилающей поверхности торфяной залежи; $F_{т}$ – сила тяжести, Н; $F_{п}$ – подъемная сила, Н, возникающая при приближении сопла к частице и фактически не действующая на частицу при ее

максимальном удалении от сопла на уровне длины оси активной зоны всасывающего факела.

Коэффициент трения при этом определяется как тангенс угла внутреннего трения φ :

$$f = tg\varphi,$$

а угол внутреннего трения для фрезерного торфа составляет 32–45° [11]. Соответственно, коэффициент трения находится в пределах 0,62–1,0.

Сила лобового давления вызвана прямым сопротивлением частицы при воздействии на нее потока жидкости или газа. Именно она является основной активной силой, причиной страгивания частицы с места и последующего возникновения подъемной силы. Силу лобового давления можно определить по зависимостям:

для ламинарного режима обтекания твердого тела [12]:

$$F_{лл} = 6\pi\mu r(v - W); \quad (2)$$

для турбулентного режима обтекания твердого тела [13]:

$$F_{лт} = c_{л} \frac{\rho_{в}}{2} S_{м}(v - W)^2, \quad (3)$$

где $c_{л}$ – коэффициент лобового сопротивления частицы (для шарообразных частиц в потоке, характеризующемся числом Рейнольдса $Re = 10^4 - 4 \cdot 10^5$ $c_{л} = 0,44 - 0,1$ [14]); $\rho_{в}$ – плотность воздуха, кг/м³; $S_{м}$ – площадь Миделя сечения частицы, м² (для шарообразной частицы радиусом r $S_{м} = \pi r^2$); v – средняя скорость воздушного потока, воздействующего на частицу, м/с; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха ($\mu = \nu\rho_{в}$), Па·с; ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с; W – скорость поступательного движения торфяной пневмоуборочной машины ($W = 5 - 8$ км/ч = 1,4–2,2 м/с).

Динамический коэффициент вязкости для воздуха можно определить по формуле Сазерленда, отражающей зависимость вязкости газа от температуры вещества. С повышением температуры вязкость газа, в отличие от жидкостей, повышается [15]:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2},$$

где μ_0 – динамический коэффициент вязкости при нормальных условиях (н. у.), $\mu_0 = 18,27 \cdot 10^{-6}$ Па·с; T_0 – температура воздуха при н. у., $T_0 = 293,15$ К; T – температура воздуха, К; C – константа Сазерленда, $C = 120$ К.

Рассматривая шарообразную частицу торфа диаметром 25 мм и погодные условия, характерные для проведения пневматической уборки, отраженные в таблице, можно по формулам (2) и (3) рассчитать значения силы лобового давления в зависимости от скорости воздушного потока для ламинарного и турбулентного режимов движения воздуха.

Параметры состояния атмосферного воздуха [16]

Температура окружающего воздуха t , °С	20	25	30
Плотность воздуха ρ , кг/м ³	1,205	1,185	1,165
Кинематический коэффициент вязкости воздуха ν , м ² /с	$15,06 \cdot 10^{-6}$	$15,53 \cdot 10^{-6}$	$16 \cdot 10^{-6}$
Динамический коэффициент вязкости воздуха μ , Па·с	$18,1 \cdot 10^{-6}$	$18,35 \cdot 10^{-6}$	$18,6 \cdot 10^{-6}$

Результат расчетов по зависимостям (2) и (3) показал, что сила лобового давления, создаваемая при турбулентном режиме при одних и тех же значениях скорости воздушного потока, в среднем на три порядка выше силы, создаваемой при ламинарном режиме движения. Следовательно, при пневматической уборке торфа необходим именно турбулентный режим движения воздушного потока. Параметры вязкости воздуха не оказывают значительного влияния на лобовую силу давления.

Бесспорно, одной из самых важных из всех вышеперечисленных сил является подъемная. Если поток жидкости (газа) обтекает частицу как сверху, так и снизу (причем местная скорость линий тока снизу меньше, чем сверху), то по закону Бернулли меняется и давление: над частицей оно меньше, чем под ней. В результате возникает вертикальная аэродинамическая подъемная сила, причиной которой является градиент скорости по высоте [17]. Под действием градиента скорости силы трения отличаются по величине на верхней и нижней сторонах частицы, что может привести к возникновению крутящего момента. При этом влияние градиента скорости на величину крутящего момента пропорционально размеру частицы. Вращение частицы под действием крутящего момента, сопровождающееся столкновениями ее с другими частицами, происходит вокруг оси, нормальной к направлению потока, но лежащей в горизонтальной плоскости. Неравномерная скорость обтекания и вращения частиц вызывает циркуляцию воздуха по контуру частицы. Если направление вращения частицы и скорости потока совпадают, то скорость течения увеличивается, если же они противоположны – уменьшается. По этой причине давление под частицей возрастает, а над частицей – уменьшается. Отсюда и возникает действующая вертикально вверх сила Магнуса, определить которую можно, воспользовавшись, например, формулой Н.Е. Жуковского [1, 4]:

$$F_M = \rho_B \frac{\pi r^3}{2} v \frac{dv}{dz}. \quad (4)$$

С учетом скорости шарообразной частицы $v_{ш}$ и скорости воздушного потока $v_{в}$ (рис. 2) уравнение (4) может быть приведено к виду

$$F_M = \frac{\pi}{\alpha} \rho_{в} r^2 v_{в} v_{ш}, \quad (5)$$

где α – угол направления воздушного потока, рад (при расположении частицы на расстоянии, равном длине оси активной зоны всасывающего факела, можно принять, что $\alpha \approx \pi$).

Для условия отрыва частицы от подстилающей поверхности необходимо выполнение условия

$$F_M \geq F_T. \quad (6)$$

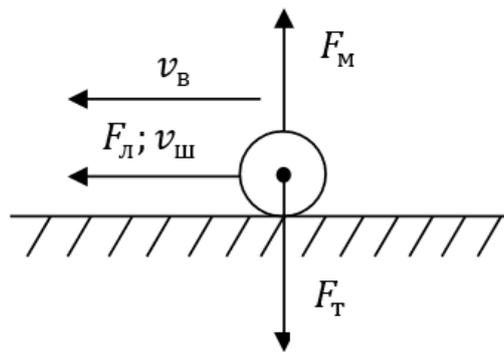


Рис. 2. Появление силы Магнуса

Подставив выражения (1) и (5) в неравенство (6), получим:

$$\frac{\pi}{\alpha} \rho_{в} r^2 v_{в} v_{ш} \geq \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{т} g, \quad (7)$$

откуда можно выразить скорость шарообразной частицы:

$$v_{ш} \geq \frac{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{т} g}{\frac{\pi}{\alpha} \rho_{в} r^2 v_{в}} = \frac{4 \alpha r \rho_{т} g}{3 \rho_{в} v_{в}}. \quad (8)$$

Приняв ориентировочно скорость воздушного потока $v_{в} \approx 10$ м/с, плотность торфа $\rho_{т} \approx 500$ кг/м³ [18, 19], $\alpha = \pi$, радиус частицы $r \approx 0,0125$ м [20, 21] и плотность воздуха $\rho_{в} \approx 1,205$ кг/м³, подсчитаем скорость движения шарообразной частицы: $v_{ш} \geq \frac{4\pi \cdot 0,0125 \cdot 500 \cdot 9,81}{3 \cdot 1,205 \cdot 10} \approx 21,3$ м/с. Для появления силы Магнуса шарообразная частица, двигающаяся со скоростью $v_{ш}$, должна вращаться с частотой n :

$$n = \frac{v_{ш}}{2\pi r},$$

$n = \frac{21,3}{2\pi \cdot 0,0125} \approx 271$ об/с, что невозможно в реальных условиях. Следовательно, невозможно и появление силы Магнуса.

Природа подъемной силы, действующей на частицу, может быть вызвана образованием воздушных вихрей под и над частицей при ее обтекании потоком воздуха. При этом вихри подкидывают частицу с поверхности, заставляя ее оторваться от слоя и начать свое движение в потоке воздуха. Данный процесс весьма напоминает эффект ветровой эрозии почв [22, 23].

Рассмотрим взаимодействие воздушного потока с частицей. Для случая обтекания воздухом торфяной частицы, изображенной на рис. 3, запишем уравнение Д. Бернулли для плоскостей 1-1 и 2-2:

$$P_1 + \frac{\rho_{\text{в}} v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_{\text{в}} v_2^2}{2},$$

где P_1 и P_2 – давление над и под частицей, Па; v_1 и v_2 – скорость воздушного потока над и под частицей, м/с.

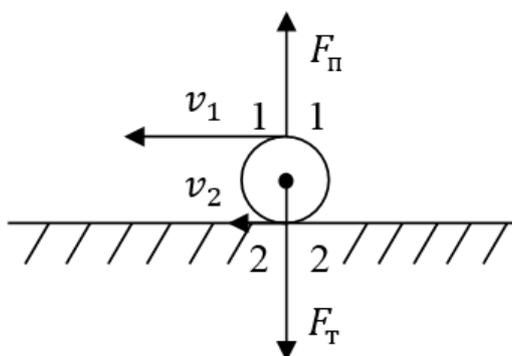


Рис. 3. Возникновение подъемной силы при обтекании частицы потоком воздуха

Так как частица в неподвижном состоянии соприкасается с подстилающей поверхностью, то скорость воздушного потока под частицей $v_2 \approx 0$. Тогда разница давлений составит

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho_{\text{в}} v_1^2}{2}.$$

Разница давлений вызывает появление подъемной силы, пропорциональной площади Миделя:

$$F_{\text{п}} = S_{\text{м}} \Delta P = S_{\text{м}} \frac{\rho_{\text{в}} v_1^2}{2}. \quad (9)$$

Для условия отрыва частицы от поверхности расстила должно выполняться условие: подъемная сила, определяемая по формуле (9), равна или превышает силу тяжести, которую находим из выражения (1):

$$\frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{т}}} = \frac{3\rho_{\text{в}} v_1^2}{4r\rho_{\text{т}}g} \geq 1, \quad (10)$$

откуда скорость воздушного потока, необходимая для подъема частицы:

$$v_{\Pi} = v_1 \geq \sqrt{\frac{4r\rho_T g}{3\rho_B}}. \quad (11)$$

Принимая значения величин, входящих в формулу (11), аналогичными к формуле (8), получим: $v_{\Pi} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0125 \cdot 500 \cdot 9,81}{3 \cdot 1,205}} \approx 8,2$ м/с. Вычисленное значение скорости воздушного потока хорошо согласуется с результатами экспериментов [24, 25], следовательно, природа подъемной силы заключена не во вращении частицы, а именно в разнице давлений над частицей и под ней.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дифференциальное уравнение движения частицы в горизонтальной плоскости (на разгонном участке) будет иметь вид

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{dv_x}{dt} = F_x,$$

где $\frac{d^2x}{dt^2}$ – проекция ускорения частицы на ось OX ; F_x – проекция результирующей силы на ось OX (см. рис. 1).

В вертикальной плоскости будем иметь уравнение

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = F_z,$$

где $\frac{d^2z}{dt^2}$ – проекция ускорения частицы на ось OZ ; F_z – проекция результирующей силы на ось OZ .

В горизонтальной плоскости перед страгиванием с места на частицу действуют лобовая сила, сила трения и сила сцепления:

$$F_x = F_L - F_{\text{тр}} - F_{\text{сц}}.$$

В вертикальной плоскости перед началом отрыва от подстилающей поверхности на частицу действует сила тяжести, подъемная сила и сила адгезии:

$$F_z = F_{\Pi} - F_T - F_{\text{ад}}.$$

Однако при движении частицы в момент отрыва ее от поверхности расстила сила адгезии крайне мала, поэтому ею можно пренебречь. Тогда на частицу будут действовать подъемная сила и сила тяжести:

$$F_z = F_{\Pi} - F_T.$$

Условия, по которым возможно страгивание частицы с места в горизонтальной плоскости на расстоянии, равном длине оси активной зоны всасывающего факела

($F_{\Pi} \approx 0$), и ее отрыв от подстилающей поверхности при приближении к соплу будут иметь вид:

$$F_x = F_l - F_{\text{тр}} - F_{\text{сц}} > 0; \quad (12)$$

$$F_z = F_{\Pi} - F_T > 0. \quad (13)$$

Решив уравнения (12) и (13) относительно лобовой и подъемной силы, получим:

$$F_l > F_{\text{тр}} + F_{\text{сц}}; \quad (14)$$

$$F_{\Pi} > F_T. \quad (15)$$

Подставим в уравнения (14) и (15) выражения для соответствующих сил: для ламинарного режима обтекания твердого тела

$$6\pi\nu\rho_B r(v_{x_l} - W) > f\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g + \pi r \sigma\right) + cS_{\text{сц}}; \quad (16)$$

для турбулентного режима обтекания твердого тела:

$$c_l \frac{\rho_B}{2} S_M (v_{x_T} - W)^2 > f\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g + \pi r \sigma\right) + cS_{\text{сц}}; \quad (17)$$

$$S_M \frac{\rho_B (v_{\Pi} - W)^2}{2} > \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g. \quad (18)$$

Решим уравнения (16–18) относительно скорости воздушного потока:

$$v_{x_l} > \frac{f\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g + \pi r \sigma\right) + cS_{\text{сц}}}{6\pi\nu\rho_B r} + W; \quad (19)$$

$$v_{x_T} > \sqrt{\frac{f\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g + \pi r \sigma\right) + cS_{\text{сц}}}{c_l \frac{\rho_B}{2} S_M}} + W; \quad (20)$$

$$v_{\Pi} > \sqrt{\frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g}{S_M \frac{\rho_B}{2}}} + W = \sqrt{\frac{8\pi r^3 \rho_T g}{3S_M \rho_B}} + W. \quad (21)$$

Уравнения (19) и (20) выражают теоретическую скорость воздушного потока, создаваемую всасывающим соплом в зоне нахождения частицы для страгивания ее с места и последующего разгона в горизонтальной плоскости при ламинарном и турбулентном режиме обтекания твердой частицы, а уравнение (21) – для начала отрыва частицы вверх от подстилающей поверхности. Из приведенных формул видно, что основными факторами, влияющими на создание скорости воздушного потока, необходимой для пневматической уборки, являются плотность и размеры торфяных частиц.

Проверка адекватности теоретической скорости воздушного потока, необходимой для страгивания торфяной шарообразной частицы с места, показала, что для условий эксперимента с опытными образцами фрезерной крошки из верхового и

переходного торфа ($r_{\text{верх}} = 0,011\ 475$ м; $r_{\text{перех}} = 0,010\ 775$ м; $t = 20$ °С; $\rho_{\text{в}} = 1,205$ кг/м³; $\rho_{\text{т верх}} = 518$ кг/м³; $\rho_{\text{т перех}} = 355$ кг/м³; $c_{\text{верх}} = 0,787$ Н/м; $c_{\text{перех}} = 0,758$ Н/м; $S_{\text{сц верх}} \approx 0,000\ 827$ м²; $S_{\text{сц перех}} \approx 0,000\ 729$ м²; $c_{\text{л}} = 0,5$; $S_{\text{м верх}} = 0,000\ 413$ м²; $S_{\text{м перех}} = 0,000\ 365$ м²; $\alpha = 30\text{--}35^\circ$; $W = 0$ [26, 27]) выражение (20) требует уточнения. Ввиду того, что силы сцепления и адгезии на порядок меньше, чем сила тяжести, в ориентировочных расчетах их можно не учитывать. Тогда

$$v_{\text{хт}} > K \sqrt{\frac{\frac{4}{3}f\pi r^3 \rho_{\text{т}} g}{c_{\text{л}} \frac{\rho_{\text{в}}}{2} S_{\text{м}}}} + W,$$

где K – уточняющий коэффициент, зависящий от вида торфа, угла установки всасывающего сопла, высоты расположения сопла над подстилающей поверхностью и др.; для верхового торфа $K = 0,47$, для переходного $K = 0,42$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Определены силы, действующие на частицу торфа в активной зоне всасывающего факела. Отмечено, что турбулентный поток воздуха создает силу лобового давления на три порядка большую, чем ламинарный.

2. Установлено, что причиной отрыва торфяной частицы от подстилающей поверхности является не сила Магнуса, вызванная вращением частицы, а подъемная сила, вызванная разницей давлений над и под частицей.

3. Разработаны математические модели, позволяющие теоретически определить минимальную скорость воздушного потока, необходимую для страгивания частицы с места и отрыва от подстилающей поверхности торфяной залежи. Отмечено, что плотность торфяных частиц и их габаритные размеры являются определяющими при оценке необходимой скорости воздушного потока.

4. Установлено, что силы адгезии и сцепления, будучи ничтожно малыми, не оказывают сколько-нибудь значительного влияния на страгивание частицы с места и ее отрыв от подстилающей поверхности и поэтому при разработке математических моделей скорости воздушного потока могут не учитываться.

5. Уточнена скорость воздушного турбулентного потока, необходимая для страгивания торфяной частицы с места.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев А.А., Мельник П.А., Тютюнник А.О. Движение частиц в воздушном потоке // *Вектор науки ТГУ*. 2011. № 3 (17). С. 82–86.

2. Солопов С.Г., Горцакалян С.Г., Чернышев В.В. Определение минимальной скорости воздушного потока на входе во всасывающее сопло пневмоуборочной машины // *Механизация добычи торфа: сборник научных трудов*. М.: Недра, 1974. Вып. XVII (XIII). С. 5–9.

3. Чернышев В.В., Горцакалян Л.О., Ворзонин В.А. Исследование механизма взвешивания торфяной фрезерной крошки с залежи во всасывающем факеле сопла пневмоуборочной машины // *Механизация добычи торфа: сборник научных трудов*. М.: Недра, 1974. Вып. XVII (XIII). С. 17–21.

4. Викторов М.С., Маринин О.О., Смык А.Ф. Применение эффекта Магнуса в инфраструктуре дороги // *Автомобиль, дорога, инфраструктура*. 2019. № 1 (19). С. 23–31.
5. Керученко Л.С., Мальцева Е.И. Механизм осаждения частиц загрязнений в капиллярных каналах // *Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции*. Томск: ТПУ, 2017. С. 288–293. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/45708> (дата обращения: 06.11.2021).
6. Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа, смазки. Красноярск: КГАУ, 2013. 192 с.
7. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1977. 280 с.
8. Лазарев А.В. [и др.]. Справочник по торфу. М.: Недра, 1982. 760 с.
9. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи. М.: Недра, 1985. 211 с.
10. Амарян Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. М.: Недра, 1969. 192 с.
11. Горфин О.С., Фомин К.В. Конвейерный транспорт. Тверь: ТГТУ, 2008. 114 с.
12. Слепков А.И. Механика. Лекции. URL: http://genphys.phys.msu.ru/slepkov/glava_9-int.pdf (дата обращения: 15.02.2022).
13. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975. 380 с.
14. Коэффициент лобового сопротивления для шара. URL: https://yandex.ru/images/search?text=коэффициент%20лобового%20сопротивления%20для%20шара&sture=image&lr=14&source=wiz&pos=5&img_url=https%3A%2F%2Fi5.rae.ru%2Fupfs%2Fi%2F2011%2F06%2Fimage118.jpg&rpt=simage (дата обращения: 06.11.2021).
15. Адельсон С.В. Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии. М.: Гостоптехиздат, 1963. 311 с.
16. Физические свойства воздуха. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (дата обращения: 15.02.2022).
17. Прандтль Л. Эффект Магнуса и ветряной корабль // *Успехи физических наук*. 1925. Т. 5. Вып. 1–2. С. 1–27.
18. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование аэродинамических параметров фрезерного торфа, добываемого ООО «Пиндstrup» // *Труды ИнсТорфа*. 2020. № 22 (75). С. 32–38.
19. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров мундштука для всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 1 (13). С. 45–56.
20. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование работы всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 40–49.
21. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Зависимость фактической длины оси всасывающего факела от угла установки сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 11 (113). Ч. 1. С. 79–85.

22. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыления воздуха. М.: Физматлит. 2007. 240 с.

23. Эффект Магнуса. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Магнуса (дата обращения: 06.11.2021).

24. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров установки сопла торфяной пневмоуборочной машины над подстилающей поверхностью залежи // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 38–45.

25. Yablonev A., Scherbakova D. Evaluation of KTT-2 Pneumatic Peat Harvesting Machine's Nozzle Suction Capacity // *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 174. URL: <https://ar.booksc.org/book/83727504/1e6e2a> (дата обращения: 19.12.2021).

26. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование и определение рациональных параметров установки всасывающего сопла пневматической торфоуборочной машины // *Горное оборудование и электромеханика*. 2022. № 2. С. 14–22.

27. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Обоснование параметров установки всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 57–62.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Анализ сил, действующих на частицу фрезерного торфа в зоне всасывающего факела пневмоуборочной машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 57–71.

ANALYSIS OF THE FORCES AFFECTING A PARTICLE OF MILLING PEAT IN THE ZONE OF THE SUCTION FLUE OF A PNEUMATIC HARVESTING MACHINE

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., D.M. SCHERBAKOVA, Postgraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: alvovich@mail.ru

The suction efficiency of milling particles by pneumatic peat harvesters is largely determined by the air flow rate created by the pneumatic system. Attempts to analytically determine this speed were made by a number of scientists not only for peat, but also in related industries – in the dedusting and pneumatic transport of sawdust. However, due to the specifics of peat milling chips, the topic is raised again. In the course of the study, it was found that the separation of a peat particle from the underlying surface is not affected by the Magnus force, but by the lifting force caused by the pressure difference above and below the particle. Mathematical models have been developed that make it possible to calculate the minimum air flow speed required to move a peat particle from its place and detach it from the underlying surface.

Keywords: peat, pneumatic peat harvester, suction nozzle, air speed, drag force, lifting force, Magnus force, Bernoulli equation.

REFERENCES

1. Sobolev A.A., Melnik P.A., Tiutiunik A.O. The movement of particles in the air stream. *Vektor nauki TGU*. 2011. No 3 (17), pp. 82–86. (In Russian).
2. Solopov S.G., Gortsakalyan L.O., Chernishov V.V. Determination of the Minimum Airflow Speed at the Inlet to the Suction Nozzle of the Pneumatic Harvester. *Mekhanizatsiya dobichi torfa: sbornik nauchnih trudov*. Moscow: Nedra, 1974. V. XVII (XIII), pp. 5–9. (In Russian).
3. Chernishov V.V., Gortsakalyan L.O., Vorzonin V.A. Study of the Weighing Mechanism of Milled Peat Chips from Deposits in the Suction Torch of the Nozzle from the Pneumatic Harvester. *Mekhanizatsiya dobichi torfa: sbornik nauchnykh trudov*. Moscow: Nedra, 1974. V. XVII (XIII), pp. 17–21. (In Russian).
4. Viktorov M.S., Marinin O.O., Smik A.F. Application of the Magnus Effect in Road Infrastructure. *Avtomobil, doroga, infrastruktura*. 2019. No 1 (19), pp. 23–31. (In Russian).
5. Keruchenko L.S., Maltseva E.I. The mechanism of Deposition of Particles of Pollution in the Capillary Channels. *Innovatsionniye tehnologii v mashinostroyenii: sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Tomsk: TPU, 2017, pp. 288–293. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/45708> (date accessed: 06.11.2021). (In Russian).
6. Polyushkin N.G. *Osnovy teorii treniya, iznosa, smazki* [Fundamentals of the Theory of Friction, Wear, Lubrication]. Krasnoyarsk: KGAU, 2013. 192 p.
7. Deriagin B.V., Krotova N.A., Smilga V.P. *Adgeziya tverdih tel* [Adhesion of solids]. Moscow: Nauka, 1977. 280 p.
8. Lazarev A.V., et al. *Spravochnik po torfu* [Peat handbook]. Moscow: Nedra, 1982. 760 p.
9. Samsonov L.N. *Frezerovaniye torfianoy zalezhi* [Milling peat deposit]. Moscow: Nedra, 1985. 211 p.
10. Amarian L.S. *Prochnost i deformiruemost torfianih gruntov* [Strength and deformability of peat soils]. Moscow: Nedra, 1969. 192 p.
11. Gorfin O.S., Fomin K.V. *Konveyerniy transport* [Conveyor transport]. Tver: TGTU, 2008. 114 p.
12. Slepков A.I. *Mechanics. Lectures*. URL: http://genphys.phys.msu.ru/slepkov/glava_9-int.pdf (date accessed: 15.02.2022).
13. Busroyd R. *Techeniye gaza so vzveshennimi chastitsami* [Gas flow with suspended particles]. Moscow: Mir, 1975. 380 p.
14. Drag coefficient for a ball. URL: https://yandex.ru/images/search?text=coefficient windshield resistance for ball&stype=image&lr=14&source=wiz&pos=5&img_url=https%3A%2F%2Fi5.rae.ru%2Fupfs%2Fi%2F2011%2F06%2Fimage118.jpg&rpt=simage (date accessed: 06.11.2021).
15. Adelson S.V. *Protsessi i apparati neftepererabotki i neftehimii* [Processes and apparatuses of oil refining and petrochemistry]. Moscow: Gostoptehizdat, 1963. 311 p.
16. Physical properties of air. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (date accessed: 15.02.2022).

17. Prandtl L. The Magnus effect and wind ship. *Uspehi fizicheskikh nauk*. 1925. No 5. Iss. 1–2, pp. 1–27. (In Russian).
18. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Study of the Aerodynamic Parameters of Milled Peat Mined by LCD Pindstrup. *Trudy Instorfa*. 2020. No 22 (75), pp. 32–38. (In Russian).
19. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Justification of the Parameters of the Mouthpiece for the Suction Nozzle of a Pneumatic Peat Harvester. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2022. No 1 (13), pp. 45–56. (In Russian).
20. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Study of the Operation of the Suction Nozzle of a Pneumatic Peat Harvester. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 3 (7), pp. 40–49. (In Russian).
21. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Dependence of the Actual Length of the Axis of the Suction Flare on the Angle of Installation of the Nozzle of the Pneumatic Peat Harvester. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2021. No 11 (113). Part 1, pp. 79–85. (In Russian).
22. Gendugov V.M., Glazunov G.P. *Vetrovaya eroziya pochvi i zapileniye vozduha* [Wind erosion of soil and air dusting]. Moscow: Fizmatlit, 2007. 240 p.
23. Magnus Effect. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect (date accessed: 06.11.2021).
24. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Substantiation of the Parameters of the Installation of the Nozzle of the Peat Pneumatic Harvester over the Underlying Surface of the Deposit. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 4 (12), pp. 38–45. (In Russian).
25. Yablonev A., Scherbakova D. Evaluation of KTT-2 Pneumatic Peat Harvesting Machine's Nozzle Suction Capacity. *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 174. URL: <https://ar.booksc.org/book/83727504/1e6e2a> (date accessed: 19.12.2021).
26. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Research and Determination of Rational Parameters for Installing the Suction Nozzle of a Pneumatic Peat Harvester. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika*, 2022. No 2, pp. 14–22. (In Russian).
27. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Justification of the Installation Parameters of the Suction Nozzle of a Pneumatic Peat Harvester. *Gorniy journal*, 2022. No 5, pp. 57–62. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 11.05.2022; после рецензирования/revised: 10.06.2022;
принята/accepted: 15.06.2022