

В.Я. Потапов, В.Н. Макаров, В.В. Потапов, Н.В. Макаров

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ФРИКЦИОННОМ СЕПАРАТОРЕ

Анализ движения частицы по наклонной плоскости проведен на основании закона об изменении энергии. С использованием аэродинамики тел произвольной формы в направленном воздушном потоке модифицирована математическая модель аэрационной классификации частиц компонентов материалов в зависимости от их физических свойств и параметров управляемого воздушного потока. В зависимости от соотношений коэффициента восстановления и мгновенного трения, которые являются случайными величинами, а также координат точки удара, возможно движение частицы по различным траекториям с разными начальными условиями. Математическая модель процесса разделения сыпучих многокомпонентных материалов на фрикционном сепараторе позволяет всесторонне исследовать процесс разделения частиц по трению и упругим свойствам и оптимизировать режимы работы аппарата при относительно небольших затратах, не прибегая к изготовлению макетов, опытных образцов и их экспериментальному исследованию. Множество вариантов движения частицы при различных значениях исходных параметров вызывает необходимость проведения математического эксперимента на ЭВМ. Это позволит подобрать наиболее рациональные конструктивные параметры самого сепаратора. На базе анализа предложенной теорий движения частиц сформулированы основные пути дальнейшего проектирования и создания фрикционных аппаратов.

Ключевые слова: скорость витания, «парусность», физические характеристики, фрикционный сепаратора, аэродинамический эффект, асбестовое волокно, воздушный поток, коэффициент сопротивления, поверхность, диаметр, трение.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-197-203

Совершенствование конструкции сепараторов и процессов, происходящих в них экономически целесообразно проводить с использованием имитационного моделирования.

Барабанно-полочный сепаратор (БПС) представляет собой совокупность нескольких устройств, каждое из которых предназначено для разделения частиц обогащаемого материала по различным признакам рис. 1.

Математическая модель исследуемого процесса поведения частиц в момент прохождения через барабанно-полочный

сепаратор содержит уравнение частицы на различных фазах разделения.

Каждая из указанных фаз движения описывается системой полученных на основании основных законов механики [1, 2].

Анализ движения частицы по наклонной плоскости проведен на основании закона об изменении энергии. Его использование позволило получить конечный результат без сложных вычислений. Значение скорости при выходе на криволинейный участок 1 (см. рис. 1):

$$V_a = \sqrt{2 \cdot g \cdot l \cdot (\sin\beta - f_{\text{ск}} \cdot \cos\beta)}, \quad (1)$$

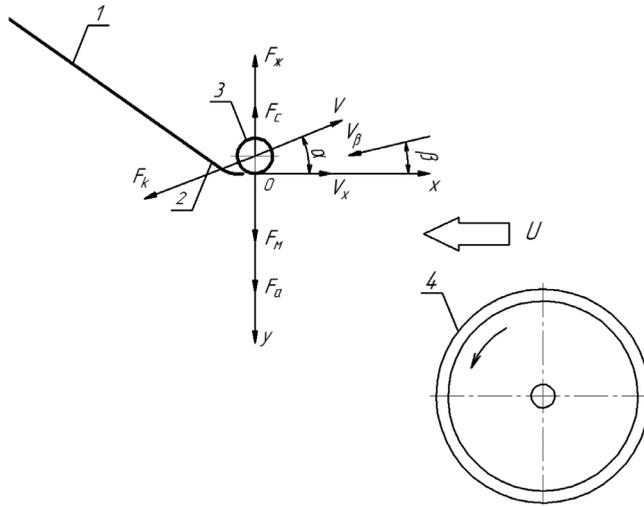


Рис. 1. Схема действия сил на частицу: 1 — разгонная плоскость; 2 — трамплин; 3 — частица; 4 — барабан

где V_a — скорость выхода частиц на трамплин, м/с; l — длина полки, м; β — угол наклона полки, град; f_{ck} — кинетический коэффициент трения; g — ускорение свободного падения м/с².

Зависимость изменения скорости частицы на криволинейном участке трамплина 2 получено из дифференциального уравнения движения материальной точки в естественных координатах. Уравнение проинтегрировано в конечной форме:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = P \cdot \sin \varphi - f_{ck} \cdot \left(m \cdot \frac{V^2}{r} + P \cdot \cos \varphi \right), \quad (2)$$

где m — масса частицы, кг; P — сила тяжести частицы, Н; φ — угол между нормалью и вертикалью при движении частицы на трамплине, град; r — радиус кривизны трамплина, м; V — скорость движения частицы на криволинейном участке трамплина, м/с.

Учитывая что целью уточнения методики расчета аэрационной классификации, то есть аэродинамики движения частиц исходного сырья с различной парусностью является установления зависимости между энергией частицы в

точке схода с криволинейного трамплина B .

Свободный полет частицы многокомпонентного исходного сырья на третьей стадии его движения в БПФСА начинается из точки B . В точке B , i -ая частица будет иметь соответствующую ей скорость V_{B_i} .

Движение i -ой частицы с кинетической энергией соответствующей скорости V_{B_i} из точки B будет происходить под действием силы аэродинамического сопротивления, подъемной аэродинамической силы Жуковского, силы Магнуса, обусловленной перепадом сил давления на поверхности частицы в следствии ее вращения, силы Архимеда, связанной с ускорением свободного падения и силой Стокса, обусловленной вязкостью воздуха. При движении i -ой частицы в направлении оси ox на нее действует сила аэродинамического лобового сопротивления $F_{Л_i}$, обусловленная как скоростью собственного движения частицы, так и скоростью направленного аэродинамического потока воздуха.

Уравнение движения i -ой частицы компонентов исходного сырья в проекции на ось ox , совпадающую с направ-

лением аэродинамического потока воздуха от действия вентиляторов запишем в виде:

$$F_{Ai} = m_i \frac{\partial V_{xi}}{\partial t} = -k_i \pi r_i^2 \rho_B (V_{xi} + U)^2 \quad (3)$$

где k_i — коэффициент лобового сопротивления i -ой частицы; r_i — радиус i -ой частицы, м; ρ_B — плотность воздуха, кг/м³; V_{xi} — составляющая скорости i -ой частицы, м/с; U — скорость потока воздуха, м/с; $m_i = (4/3)\pi r_i^3 \rho_i$ — масса i -ой частицы, кг; ρ_i — плотность i -ой частицы, кг/м³.

Уравнение движения i -ой частицы в проекции на ось ou имеет вид:

$$m_i \frac{\partial V_{yi}}{\partial t} = -F_{ji} + F_{Ai} - F_{Ci} + F_{Mi} ; \quad (4)$$

где $F_{ji} = c_i \pi r_i^2 \rho_B (V_{xi} + U)^2$ — сила Жуковского направленной вертикально вверх, действующая на i -ую частицу;

$F_{Ai} = (4/3)\pi r_i^3 (\rho_i - \rho_B)g$ — сила направленная вниз Архимеда, действующая на i -ую частицу;

$F_{Ci} = \varphi_i \rho_B \pi \eta r_i V_{yi}$ — сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья;

$F_{Mi} = \pi \rho_i r_i^3 \Omega_i (V_{xi} + U)$ — сила Магнуса, обусловленная вращением i -ой частиц компонентов исходного сырья;

c_i — коэффициент подъемной силы Жуковского действующей на i -ую частицу; g — ускорение свободного падения м/с²; φ_i — коэффициент формы частицы в законе Стокса; η — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; $\Omega_i = V_{\text{в}} / (2\pi r_i)$ — угловая скорость вращения i -ой частицы, с⁻¹.

Таким образом, уравнение вертикального перемещения в проекции на ось ou i -ой частицы компонентов исходного сырья под действием направленного аэродинамического потока воздуха с учетом действия сил Стокса, Магнуса, Архимеда и Жуковского может быть представлено в виде:

$$m_i (\partial V_{yi} / \partial t) = -c_i \pi r_i^2 \rho_B (V_{xi} + U)^2 + \rho_B m_i g - \varphi_i \pi \eta r_i V_{yi} + \pi \rho_B r_i^3 \Omega_i (V_{xi} + U) \quad (5)$$

Учитывая, что $V_{yi} \ll (V_{xi} + U)$ в уравнениях (4), (5) не учитывается аэродинамическая сила лобового сопротивления в проекции на ось ou .

С учетом уравнения баланса сил Жуковского, Архимеда, Стокса и Магнуса скорость вертикального перемещения V_{yi} i -ой частицы компонентов исходного сырья получим в виде:

$$V_{yi} = \frac{r_i \left[-\frac{4}{3} r_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_2} - 1 \right) q + r_i \Omega_i (V_{xi} + U) - A_i (V_{xi} + U)^2 \right]}{\varphi_i \eta_i} \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что при скорости направленного аэродинамического потока воздуха U вниз, по направлению оси ou будут перемещаться частицы компонентов, размеры которых определяется зависимостью:

$$r_i > \frac{A_i (V_{xi} + U)^2}{-\frac{4}{3} r_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_2} - 1 \right) g + (V_{xi} + U) \Omega_i} \quad (7)$$

Энергия i -ой частицы при сходе с нижней кромки B наклонной полки определяется по формуле:

$$E_i = (2/3) \pi r_i^3 \rho_i V_{\text{в}}^2 \quad (8)$$

Таким образом, горизонтальная скорость движения i -ой частицы становится равной нулю $V_{xi} = 0$ в точке на горизонтальной поверхности приемного бункера БПС, определяемой из условия:

$$X_{0i} = E_i / F_{\Lambda}^i \quad (9)$$

С учетом формул (1), (7) получим:

$$X_{0i} = (2\rho_i V_{\text{в}}^2 r_i) / (3\rho_B U^2 c_i) \quad (10)$$

С учетом (1), (2), (3), (5) выражения для коэффициентов аэрационного притяжения и инерции примут вид:

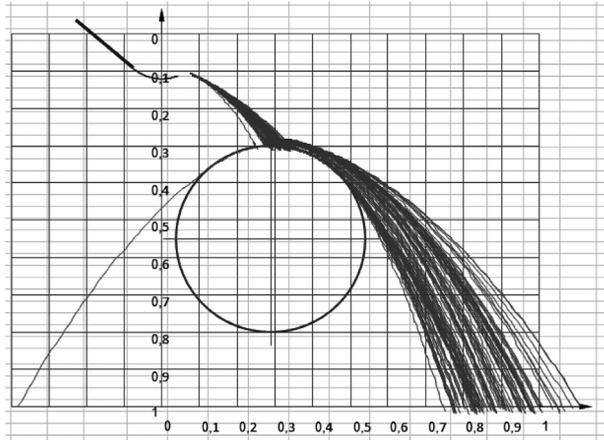


Рис. 2. Траектория движения частиц при скорости воздуха 0 м/с и угле $\beta = 0^\circ$

$$\alpha_i = (F_{\text{жи}} - F_{\text{Ми}})/(F_{\text{Аи}}) \quad (11)$$

$$\beta_i = (F_{\text{Аи}})/(F_{\text{Аи}})$$

Данные уравнения поддаются лишь численному интегрированию на ЭВМ.

При ударе частицы о вращающийся барабан 4 уменьшается величина скорости частицы и меняется ее направление. Соотношение для их определения получены с использованием методов теории удара.

Величина угла отражения определяется в виде:

$$\alpha_{\text{от}} = \arctg x \left[\frac{1}{k(\text{tg}\alpha_n \pm \lambda) \pm \lambda} \right],$$

где $\alpha_{\text{от}}$ — угол отражения частицы, град; α_n — угол падения, град; k — коэффициент восстановления при ударе; λ — коэффициент трения при ударе.

Величина скорости отражения частиц от барабана после определения $\alpha_{\text{от}}$ может быть выражено из уравнения:

$$V_{\text{от}} = \frac{V_n (\sin\alpha - \lambda \cos\alpha_n)}{(\sin\alpha_{\text{от}} + \lambda \cos\alpha_{\text{от}})}$$

где V_n — скорость падения частицы, м/с.

Учитывая случайный характер изменения величин, входящий в приведенное уравнение модели расчет ведется на ПЭВМ с использованием методов

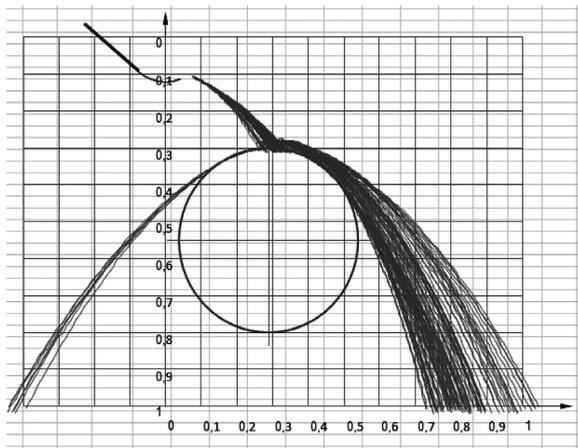


Рис. 3. Траектория движения частиц при скорости воздуха 5 м/с и угле $\beta = 60^\circ$

математической статистики. Множество вариантов движения частицы при различных значениях исходных параметров убеждает в необходимости проведения математического эксперимента на ЭВМ. Это позволит не только предсказать поведение в сепараторе частиц с различным содержанием полезного компонента, но и подобрать наиболее рациональные конструктивные параметры самого сепаратора.

На рис. 2–3 приведены примеры траекторий движения частиц, полученных при решении на ЭВМ. По рисунку видно, что разделение породных и асбестовых частиц может быть эффективным. Значительное влияние на эффективность разделения оказывают следующие факторы: диаметр барабана, угловая скорость, угол наклона, поверхность разделения (сталь, резина), координаты установки оси вращения барабана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравец Б. Н. Специальные и комбинированные методы обогащения. — М.: Недра, 1986. — 340 с.
2. Олюнин В. В. Переработка нерудных строительных материалов. — М.: Наука, 1988. — 232 с.
3. Практика обогащения асбестовых руд / Под ред. Ф. П. Сафронова. — М.: Недра, 1975. — 224 с.
4. Цыпин Е. Ф. Научные основы технологии предварительного обогащения минерального и техногенного сырья: автореф. дис. д-ра техн. наук. — Екатеринбург, 2000. — 44 с.
5. Ляпцев С. А., Потапов В. Я. Математическое описание поведения рудных частиц в воздушном потоке разделительных аппаратов // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 1. — С. 7–10. URL: www.science-education.ru/101-5493.
6. Потапов В. В. Технология разработки месторождений угля с предварительным его обогащением в подземных условиях: дисс. ...канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2007. — 210 с.
7. Afanasyev A. I., Potapov V. Ya., Potapov V. V., Franyuk E. E. Mathematical Model of Particles' Motion in an AirFriction Separator // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2017. — Т. 23. — № 8. — С. 24–28.
8. Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block (SCOPUS) // Refractions and Industrial Ceramics. — 2017. — Vol. 38. — № 3. — pp. 288–292.
9. Ляпцев С. А., Вебер Г. Э. Математическое моделирование механических явлений. — Екатеринбург, 1993. — 110 с.
10. Бахвалов Н. С. Численные методы. — М.: Наука, 1973. — 631 с.
11. Owyer F. B., Thompson R. L. Ore sorting / Develop and Innosot. Aust. Process Ind. Aust. Chen. Eg. Conf., Newcastle, 1972, Pop. Sydney, S. A. — Pp. 81–88.
12. Tsypin E. F., Morozov Yu. P. Models and laws of the informational processes of dressing / 2nd Regional APCOM' 97 Symposium on computer application and operations research in the mineral industries. Moscow, Russia, August 24–28. — 1997. — Pp. 367–371.
13. Келина И. М., Цыпин Е. Ф., Александрова Е. П. О коэффициентах трения минералов при обогащении слюдо содержащих сланцев на полочном воздушном сепараторе // Известия вузов. Горный журнал. — 1983. — № 1. — С. 126–129.
14. Белов М. А., Дябин Н. В., Копосов Ю. Б. и др. Практика обогащения асбестовых руд / Под ред. Ф. П. Сафронова. — М.: Недра, 1975. — 224 с.
15. Брусиловский И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов. — М.: Машиностроение, 1984. — 240 с.
16. Тимухин С. А. Оптимизация параметров и процессов стационарных машин. Учебное пособие. — Екатеринбург: изд. УГГУ, 2009. — С. 44.
17. Ляпцев С. А., Потапов В. Я., Давыдов С. Я., Потапов В. В., Семериков Л. А., Васильев Е. А. Классификация материалов при ударе о разделительную поверхность // Новые огнеупоры. 2014. — № 12. — С. 27–30.

18. Makarov V.N., Davydov S.Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // Springer science + business media. New York. 2015. № 2. pp. 59–63.

19. Потапов В.Я. Тимухин С.Я. Потапов В.В. и др. Использование аэродинамического эффекта в фрикционных сепараторах для разделения минеральных комплексов обладающих парусностью // Известия УГГУ. — 2011. — № 25–26. — С. 84–89. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Потапов Валентин Яковлевич*¹ — доктор технических наук, профессор, e-mail: 2c1@inbox.ru,

*Макаров Владимир Николаевич*¹ — доктор технических наук, профессор, e-mail: gmf.gm@m.ursmu.ru,

*Потапов Владимир Валентинович*¹ — кандидат технических наук, доцент, e-mail: 2c1@inbox.ru,

*Макаров Николай Владимирович*¹ — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: mnikolay84@mail.ru,

¹ Уральский государственный горный университет.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 4, pp. 197–203.

V.Ya. Potapov, V.N. Makarov, V.V. Potapov, N.V. Makarov

ANALYSIS OF PARTICLE MOTION IN FRICTION SEPARATOR

A friction separator is composed of mechanical devices that separate flow particles based on their characteristics. The analysis of separation of material particles in a friction separator involves the equation of motion at each stage of separation (inclined plane, curved portion of flow-spreading hump, particle collision with the drum surface, free motion until separation zone exit) and differential equation of particle motion in circulating air flow. Each of the motion phases is described by a system of equations based on the key mechanical laws. The particle motion on the inclined plane is analyzed based on the law of energy variation. Using the aerodynamics of an arbitrary shape body in the directional air flow, the mathematical model of aeration classification of particles with respect to their physical properties and directional air flow parameters is modified. Depending on the ratios of recovery and instantaneous friction coefficients, which are random values, as well as subject to the collision point coordinates, a particle can move along different trajectories at different initial conditions. The mathematical model of separation of multi-component granular material on a friction separator enables analyzing comprehensively the process of separation by friction and the elastic properties of particles, and makes it possible to optimize operating conditions of the separator at relatively low cost, without manufacture and experimental investigation of prototypes. The multitude of variants of particle motion at different values of initial parameters calls for the mathematic experimentation using a dataflow machine. This will permit to select the best rational structural parameters of the friction separator. Based on the proposed theory of particle motion, the main lines of the further design and engineering of friction separators are formulated.

Key words: airborne particle velocity, air drag, physical characteristics, friction separator, aerodynamic effect, asbestos fiber, air flow, resistance coefficient, surface, diameter, friction.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-197-203

AUTHORS

*Potapov V.Ya.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: 2c1@inbox.ru,

*Makarov V.N.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: gmf.gm@m.ursmu.ru,

Potapov V.V.¹, Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: 2c1@inbox.ru,
Makarov N.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Head of Chair, e-mail: mnikolay84@mail.ru,
¹ Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

REFERENCES

1. Kravets B. N. *Spetsial'nye i kombinirovannye metody obogashcheniya* (Special and mixed methods of processing), Moscow, Nedra, 1986, 340 p.
2. Olyunin V. V. *Pererabotka nerudnykh stroitel'nykh materialov* (Processing of nonmetallic construction materials), Moscow, Nauka, 1988, 232 p.
3. *Praktika obogashcheniya asbestovykh rud*. Pod red. F. P. Safronova (Experience of asbestos ore beneficiation. Safronov F. P. (Ed.)), Moscow, Nedra, 1975, 224 p.
4. Tsylin E. F. *Nauchnye osnovy tekhnologii predvaritel'nogo obogashcheniya mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya* (Scientific framework for the pretreatment technology for minerals and mining waste), Doctor's thesis, Ekaterinburg, 2000, 44 p.
5. Lyaptsev S. A., Potapov V. Ya. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012, no 1, pp. 7–10. URL: www.science-education.ru/101-5493.
6. Potapov V. V. *Tekhnologiya razrabotki mestorozhdeniy uglia s predvaritel'nym ego obogashcheniem v podzemnykh usloviyakh* (Technology of coal mining with the in situ pre-dressing), Candidate's thesis, Ekaterinburg, 2007, 210 p.
7. Afanasyev A. I., Potapov V. Ya., Potapov V. V., Franyuk E. E. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017, vol. 23, no 8, pp. 24–28.
8. Makarov N. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block (SCOPUS). *Refractions and Industrial Ceramics*. 2017. Vol. 38, no 3. pp. 288–292.
9. Lyaptsev S. A., Veber G. E. *Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskikh yavleniy* (Mathematical modeling of phenomena in mechanics), Ekaterinburg, 1993, 110 p.
10. Bakhvalov N. S. *Chislennye metody* (Numerical methods), Moscow, Nauka, 1973, 631 p.
11. Owyer F. B., Thompson R. L. Ore sorting. *Develop and Innosot. Aust. Process Ind. Aust. Chem. Eg. Conf., Newcestele*, 1972, Pop. Sudney, S. A. Pp. 81–88.
12. Tsylin E. F., Morozov Yu. P. Models and laws of the informational processes of dressing. *2nd Regional APCOM' 97 Symposium on computer application and operations research in the mineral industries*. Moscow, Russia, August 24–28. 1997. Pp. 367–371.
13. Kelina I. M., Tsylin E. F., Aleksandrova E. P. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1983, no 1, pp. 126–129.
14. Belov M. A., Dyabin N. V., Kuposov Yu. B. *Praktika obogashcheniya asbestovykh rud*. Pod red. F. P. Safronova (Experience of processing of asbestos ore. Safronov F. P. (Ed.)), Moscow, Nedra, 1975, 224 p.
15. Brusilovskiy I. V. *Aerodinamika osevykh ventilyatorov* (Aerodynamics of axial fans), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 240 p.
16. Timukhin S. A. *Optimizatsiya parametrov i protsessov statsionarnykh mashin*. Uchebnoe posobie (Optimization of parameters and processes for stationary machines. Educational aid), Ekaterinburg, UGGU, 2009, pp. 44.
17. Lyaptsev S. A., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Potapov V. V., Semerikov L. A., Vasil'ev E. A. *Novye ogneupory*. 2014, no 12, pp. 27–30.
18. Makarov N. N., Davydov S. Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises. *Springer science + business media*. New York. 2015, no 2. pp. 59–63.
19. Potapov V. Ya. Timukhin S. Ya. Potapov V. V. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2011, no 25–26, pp. 84–89.

FIGURES

Fig. 1. Pattern of forces applied to a particle: 1–inclined plane (boost); 2–flow-spreading hump; 3–particle; 4–drum

Fig. 2. Particle trajectory at the air flow rate of 0 m/s and angle $\beta = 0$ deg.

Fig. 3. Particle trajectory at the air flow rate of 5 m/s and angle $\beta = 60$ deg.