

УДК 627.867.82

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПНЕВМОТРАНСПОРТА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ

Гущин О.В., Чернецкая-Белецкая Н.Б.

IMPROVEMENT OF PNEUMOTRANSPORT OF BULKES ON THE BASIS OF THE SYNERGETIC CONCEPTION

Gushchin O., Chernetskaya-Beletskaya N.

Процессы взаимодействия движущегося воздушного потока с перемещаемыми сыпучими материалами в пневмотранспортном трубопроводе рассматриваются на основе синергетической концепции. Совершенствование и разработка новых высокоэффективных энергосберегающих способов пневматического транспортирования сыпучих материалов осуществляется с использованием структурированных режимов движения аэросмесей. Рассмотрены протекающие в пневмотранспортном трубопроводе бифуркационные процессы, формирование и особенности структурированных режимов течения аэросмесей.

Ключевые слова: пневмотранспорт, аэросмесь, синергетика, воздушный поток, сыпучий материал.

Введение. Дальнейший научно-технический прогресс, направленный на решение важнейших проблем, стоящих перед промышленностью Украины, в первую очередь топливных, энергетических, металлургических, строительных, экологических и других невозможен без повышения эффективности промышленного транспорта. Благодаря своей высокой производительности, непрерывному процессу перемещения насыпных грузов, высокой степени автоматизации и другим позитивным сторонам пневматический транспорт получил широкое распространение в различных отраслях промышленности. На промышленных предприятиях металлургического комплекса системами трубопроводного транспорта за год перемещается около 500 млн. тонн сырья, больше 40% которого составляют сыпучие грузы. Затраты на разработку транспортных систем составляют 30-45% себестоимости продукции, а эксплуатационные расходы достигают 30-50% стоимости оборудования. В этих условиях, совершенствование промышленного пневматического трубопроводного транспорта сыпучих материалов играет первостепенную роль.

На промышленных предприятиях широкое распространение получили высоконапорные пневмот-

ранспортные установки, как известно, имеющие ряд существенных недостатков: высокая энергоемкость процесса транспортирования, большой расход воздуха, деградация частиц сыпучего материала в процессе перемещения, малые сроки службы магистральных трубопроводов, закупорка трубопроводов, необходимость очистки больших объемов воздуха, выбросы пыли в окружающую среду и др. [1, 2].

Разработка принципиально новых энергосберегающих, экологически чистых высокоэффективных способов пневматического транспортирования сыпучих материалов способствует улучшению технико-экономических показателей транспорта промышленных предприятий. Применение экологически чистого пневматического транспорта актуально как для больших грузопотоков, так и для небольших технологических систем. Задача рационального использования возможностей пневмотранспорта сыпучих материалов может быть решена на основе снижения энергозатрат на процесс транспортирования, уменьшения эксплуатационных расходов, повышении сроков службы и надежности установок и улучшения экологии окружающей среды.

Постановка проблемы. В связи с этим актуальной проблемой является разработка научно обоснованной концепции совершенствования пневматического транспорта сыпучих материалов. Данная концепция заключается в разработке новых энергосберегающих способов пневматического транспортирования сыпучих материалов, основанная на использовании структурированных режимов движения аэросмесей.

Анализ последних исследований и публикаций. Существующие способы пневматического транспортирования сыпучих материалов, как известно, обладают высокой энергоемкостью процесса транспортирования вследствие высокой скорости движения аэросмесей [1...7]. Пневматический транспорт с движением частиц во взвешенном состоянии являе-

тя наиболее изученным. В пневмотранспортном трубопроводе имеет место силовое взаимодействие газового потока с твердыми границами сыпучего материала и стенками трубопровода. Механизм этого взаимодействия определяет закономерности течения аэросмесей, влияет на потери давления по длине транспортного трубопровода, расход энергии на процесс транспортирования и износ транспортного трубопровода. Вопросы определения сопротивлений движению твердой и несущей компоненты рассмотрены в работах [8...16].

Современный подход к созданию пневмотранспортных установок, работающих при нетрадиционных режимах движения аэросмесей, базируется на исследованиях фазовых состояний и переходов аэросмесей, условий их формирования и сохранения на различных участках транспортного трубопровода [18, 19]. Улучшение технических показателей пневмотранспорта сыпучих материалов достигается интенсификацией массопереноса путем энергетической подпитки посредством дополнительно вдуваемых воздушных струй, созданием завихренности потока, вибрационным воздействием на сыпучий материал или объединенным действием нескольких факторов [20, 21]. Улучшению массопереноса способствуют и колебательные процессы, возникающие в трубопроводе, обусловленные структурированным движением аэросмесей и волнами «сжатия – разрежения» газоматериального потока.

Цель статьи. Целью работы является исследование взаимодействия воздушных потоков с движущимися в пневмотранспортном трубопроводе сыпучими материалами, установление закономерностей протекающих процессов и, на этой базе, разработка физических и научных основ создания высокоэффективных энергосберегающих способов пневматического транспортирования.

Результаты исследований. Исследования режимов движения гомогенных и гетерогенных потоков показали, что в пневмотранспортном трубопроводе наблюдается переход от ламинарного в устойчивое турбулентное движение через ряд промежуточных неустойчивых состояний по постоянно повторяющейся схеме (П↔Х) «Порядок↔Хаос» [22,23]. Формирование структурированных режимов движения аэросмесей в трубопроводе под воздействием дополнительно подводимого воздушного потока сопровождается возникновением бифуркационных зон в области вдуваемой воздушной струи (рис. 1, 2).

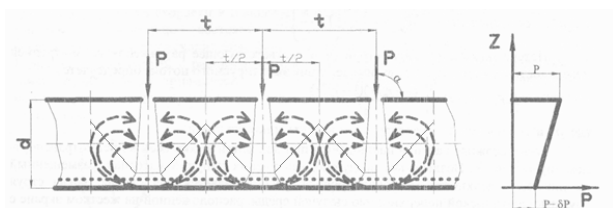


Рис. 1. Схема формирования вихревых структур аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе ($\alpha=90^\circ$)

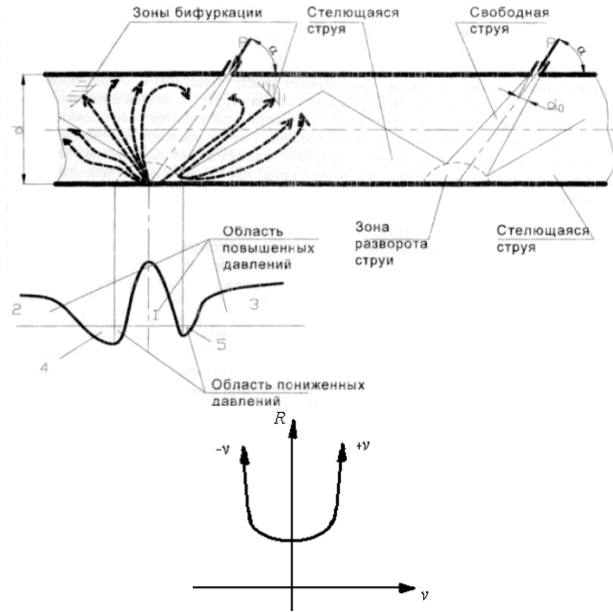


Рис. 2. Схема формирования бифуркационных зон в пневмотранспортном трубопроводе (угол атаки воздушной струи $\alpha=45^\circ$)

Течение i -го элемента газоматериального потока (рис.3) описывается системой уравнений:

$$(m_M + m_B) \left(\frac{dU}{dt} \right)_i + s(P_{i+1} - P_i) + \frac{U_i^2}{D} (m_B \lambda_B + m_M \lambda_M) = 0;$$

$$P_i = \rho_i RT_i; h_i = C_p T; \int_0^{l_0} \varepsilon_{B_i} \rho_{B_i} s de = G_B; \quad (1)$$

$$\int_0^{l_0} \varepsilon_{M_i} \rho_{M_i} s de = G_M; \quad \varepsilon_{B_i} + \varepsilon_{M_i} = 1,$$

где m_M, m_B – массы материала и воздуха входящего в i - q элемент протяженностью l_0 ; U_i – скорость центра тяжести элемента; s – площадь поперечного сечения материалопровода; D – диаметр материалопровода; P_{i+1}, P_i – статическое давление воздуха перед i -ой и за i -ой массой смеси; λ_M, λ_B – коэффициенты сопротивления движению соответственно несущей среды и транспортируемого материала; ρ_i – плотность несущего воздушного потока; R – газовая постоянная; T – температура по Кельвину; h_i – энтальпия газа; C_p – коэффициент теплоемкости газа при постоянном давлении; $\varepsilon_{M_i}, \varepsilon_{B_i}$ – объемные плотности воздуха и материала.

В результате решения системы уравнений критическое значение скорости $U_{кр}$ у выходного сечения пневмотранспортного трубопровода определяется из уравнения:

$$U_{\text{ед}} = b \left[1 + \sqrt{1 + 2 \frac{B(\chi - 1) - \chi \cdot k(1 + \mu_\phi) b^2}{b^2 [2\chi \cdot k - (\chi - 1)] (1 + \mu_\phi)}} \right], \quad (2)$$

где B – постоянная уравнения энергии; $\chi = c_p/c_v$ – отношение теплоемкостей при постоянном объеме;

k – коэффициент изменения интенсивности изменения энтальпии; b – ширина потока; μ_φ – массовая концентрация аэросмеси зависящая от соотношения скоростей несущего воздушного потока и твердой компоненты.

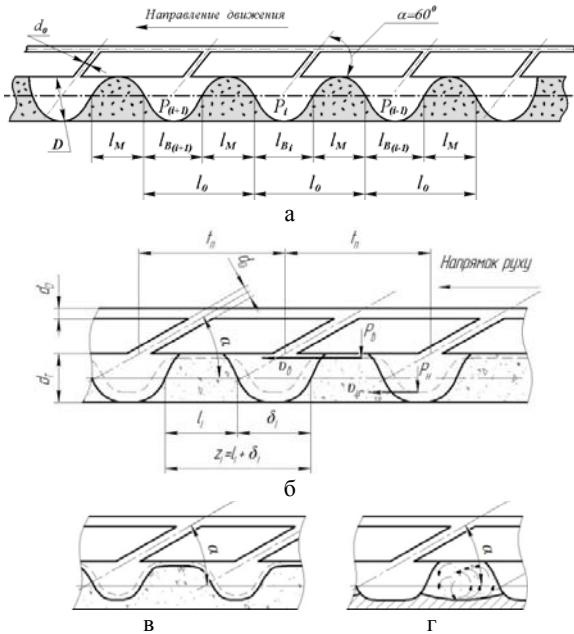


Рис.3. Схемы формирования структурированного движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе: порциями (а, б) и волнами (в, г)

Анализ графиков изменения критической скорости движения потока в зависимости от массовой концентрации смеси, построенных по уравнению (2), свидетельствует, что критическая скорость движения потока уменьшается с увеличением массовой концентрации (рис.4).

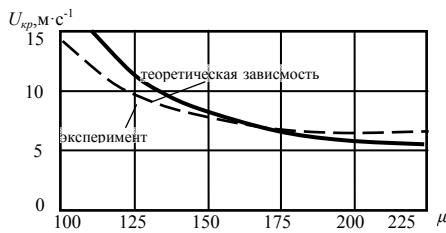


Рис. 4. Изменение критической скорости движения аэросмеси от её массовой концентрации при T=300K

При массовой концентрации $\mu=130\dots 200$ кг/кг, отвечающий стабильному структурированному движению, среднее значение скорости движения потока находится в пределах $5\dots 8$ м·с⁻¹, что согласуется с результатами экспериментальных исследований.

Анализ течения высококонцентрированных аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе показал, что структурированные режимы движения волновой и порционный характеризуются постоянными взаимными переходами. Процессы перехода

вызваны следующими возмущениями: набегающего воздушного потока, формой частиц и их положения по поперечному сечению материалопровода, шероховатостью внутренней поверхности трубы и самих частиц, изменением энтропии и постоянно протекающими осцилляционными процессами. Внутриволновая и внутриволновая турбулентность сопровождаются диссипацией энергии в масштабных вихревых структурах. Энергетическая подпитка для поддержания турбулентности осуществляется воздействием дополнительных воздушных потоков [24]. Визуализация на макроуровне рассматриваемых режимов движения аэросмесей показала, что упорядоченные структуры имеют место вдоль всего трубопровода, структуры повторяются как в направлении стелющегося потока, так и в общем направлении движения. Крупные структуры играют важную роль в механике переноса энергии сквозь развитую область автомодельного течения. Подобность структур турбулентности отображается в границах распределения, таких как перемеживаемость и нормированная частота прохождения границ распределения, для описания которых используются соотношения [25]:

$$\gamma = 0,5 - \exp\left[\frac{1}{0,41}\left(\frac{y-y_m}{b} - 0,11\right)\right];$$

$$\frac{f_v}{f_{vm}} = \exp\left[-0,5\left(\frac{y-y_m}{0,41b}\right)^2\right],$$
(3)

где γ – коэффициент перемеживаемости; y – поперечная координата; y_m – поперечная координата области с максимальной частотой прохождения границы раздела; b – ширина потока; f_v – частота прохождения границы раздела; f_{vm} – максимальная частота прохождения границы раздела.

График изменения $C1=C_1=f(x/d)$ (рис. 5), построенный по результатам визуализации течения аэросмесей, подтверждает гипотезу об асимптотическом его приближении к своему автомодельному значению

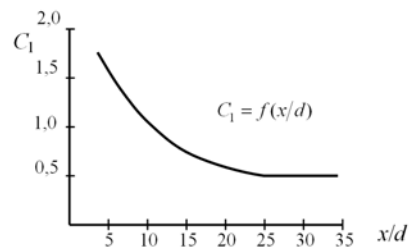


Рис. 5. Изменение критической скорости движения аэросмеси от её массовой концентрации при T=300K

Выводы. 1 Современный подход к совершенствованию и созданию новых высокоэффективных пневмотранспортных установок для сыпучих мате-

риалов базирується на исследованиях фазовых состояний, условий формирования аэросмесей и их сохранения на различных участках пневмотранспортного трубопровода. Улучшение технических показателей пневмотранспорта достигается интенсификацией массопереноса путем использования структурированных режимов движения аэросмесей, т.е. волнового и порционного.

2 Разработана концепция самоорганизации и управления движением двухкомпонентного гомогенного и гетерогенного потоков в пневмотранспортном трубопроводе. Разработаны физические и математические модели массопереноса сыпучих материалов при структурированных режимах движения аэросмесей. Обосновано, что наиболее перспективным является использование волнового или порционного режимов движения аэросмеси, для которых разность скоростей несомой и несущей компоненты минимальна.

3 Объяснение явлений, протекающих при движении аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе, позволило наметить и осуществить ряд новых технических решений по совершенствованию пневматического транспорта сыпучих материалов на основе использования структурированных режимов движения аэросмесей.

Л и т е р а т у р а

- Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт / А.Е. Смолдырев. – М.: Недра, 1980. – 293с.
- Волошин А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наук. думка, 2001. – 519с.
- Смолдырев А.Е. Гидро и пневмотранспорт в металлургии / А.Е. Смолдырев. – М.: Металлургия, 1985. – 280с.
- Потураев В.Н. Вибрационно-пневматическое оборудование сыпучих материалов / В.Н. Потураев, В.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наук. Думка, 1989. – 248с.
- Клячко Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л.С. Клячко, Э.Х. Одельский, Б.М. Хрусталев. – Минск: Наука и техника, 1983. – 216с.
- Разумов И.М. Псевдооживление и пневматический транспорт сыпучих материалов / И.М. Разумов. – М.: Химия, 1984. – 346с.
- Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред / Г.М. Островский. – СПб.: Наука, 2000. – 359с.
- Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736с.
- Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами / Р. Бусройд. – М.: Мир, 1975. – 378с.
- Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С.Соу. – М.: Мир, 1971. – 536с.
- Михаэлидис Е.Е. Движение частиц в газовом потоке. Средняя скорость и потеря давления / Е.Е. Михаэлидис // Теоретические основы инженерных расчетов. Труды Американского общества инженеров-механиков. – М.: Мир, 1988. № 1. – С. 276-288.
- Цой Ё.Д. Исследование турбулентного течения в трубе газа с взвешенными твердыми частицами / Ё.Д. Цой // Теоретические основы инженерных расчетов. Труды Американского общества инженеров-механиков. – М.: 1983, №3. – С. 166-172.
- Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – 464с.
- Gousthine V. Synergetyczna koncepcja opracowywania nowych instalacji transport pneumatycznego dla przemyslu odlewniczego / V. Gousthine // nowoczesne odlewnicze. – Ochrona srodowiska, III miedzyna, rodnova konferengja. Krakow, 7-9 wrznsnia, 2000. – P. 69-76.
- Dmitrienko D. Modeling the motion of particles in the pneumatic transport mills / D. Dmitrienko, S. Lenich // Teca Kom. of Mot. and Energ. in Arg. – 2012, Vol. 12, № 3, P.19-23
- Нечаев Г.І. Моделювання руху частинок вугілля в пневмотранспортних подріблювальних установках / Г.І. Нечаєв, Д.В. Дмитренко, С.В. Леніч // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Далі. – Луганськ, 2012. - №9(180) частина 1. – С. 71-76.
- Гущин В.М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів / В.М. Гущин // Машинознавство, 2000, №2 (23). – С. 39-43.
- Гущин В.М. Анализ режимов движения аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе / В.М. Гущин // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 36. Наук. Праць. – Краматорськ, 2010. - №1 (18). – С. 78-83.
- Гущин В.М. Интенсификация процессов пневматического транспортирования сыпучих материалов / В.М. Гущин // Промислова гідраліка і пневматика. – 2004. - №2 (4). – С. 29-32.
- Гущин В.М. Управление и интенсификация процессов пневматического транспортирования сыпучих материалов струйным воздействием воздушного потока / В.М. Гущин, О.В. Гущин // Теорія і практика будівництва. – 2009. - №5. – С. 6-15.
- Гущин В.М. Управление движением аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе струйным воздействием воздушного потока / В.М. Гущин // Промислова гідраліка і пневматика. – 2006. - №4 (10). – С. 21-25.
- Хакен Г. Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен // Пер. с англ. – М.: Наука, 1991. – 204с.
- Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М.: Мир, 1991. – 368с.
- Гущин В.М. Новые пневмотранспортные установки для перемещения сыпучих материалов / В.М. Гущин // 36. наук. праць. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – К.: Вип. 55, 2000. – С. 70-74.
- Абрамович Н.Г. Теория турбулентных струй / Н.Г. Абрамович. – М.: Гл. ред. физ-мат. лит-ры., 1984. – 716с.

References

- Smoldyrev A.E. Truboprovodnyj transport / A.E. Smoldyrev. – M.: Nedra, 1980. – 293s.
- Voloshin A.I. Mehanika pnevmotransportirovaniya sypuchih materialov / A.I. Voloshin, B.V. Ponomarev. – K.: Nauk. dumka, 2001. – 519s.
- Smoldyrev A.E. Gidro i pnevmotransport v metallurgii / A.E. Smoldyrev. – M.: Metallurgiya, 1985. – 280s.
- Poturaev V.N. Vibracionno-pnevmaticheskoe oborudovanie sypuchih materialov / V.N. Poturaev, V.I. Voloshin, B.V. Ponomarev. – K.: Nauk. Dumka, 1989. – 248s.

5. Klyachko L.S. Pnevmaticheskij transport sypuchih materialov / L.S. Klyachko, E.H. Odel'skij, B.M. Hrustalev. – Minsk: Nauka i tehnika, 1983. – 216s.
 6. Razumov I.M. Pseudoojijenie i pnevmaticheskij transport sypucyih materialov / I.M. Razumov. – M.: Himiya, 1984. – 346s.
 7. Ostrovskij G.M. Prikladnaya mehanika neodnorodnyh sred / G.M. Ostrovskij. – SPB.: Nauka, 2000. – 359s.
 8. Lojcyanskij L.G. Mehanika jidkosti i gaza / L.G. Lojcyanskij. – M.: Nauka, 1978. – 736s.
 9. Busrojd R. Techenie gaza so vzveshennymi chasticami / R. Busrojd. – M.: Mir, 1975. – 378s.
 10. Sou S. Gidrodinamika mnogofaznyh sistem / S.Sou. – M.: Mir, 1971. – 536s.
 11. Mihaelidis E.E. Dvijenie chastic v gazovom potoke. Srednââ skorost' i poterâ davleniâ / E.E. Mihaelidis // Teoreticheskie osnovy inženernyh raschetov. Trudy Amerikanskogo obshchestva inženerov-mehaniikov. – M.: Mir, 1988. № 1. – S. 276-288.
 12. Coj E.D. Issledovanie turbulentnogo techeniya v trube gaza s vzveshennymi tverdyimi chasticami / E.D. Coj // Teoreticheskie osnovy inženernyh raschetov. Trudy Amerikanskogo obshchestva inženerov-mehaniikov. – M.: 1983, №3. – S. 166-172.
 13. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznyh sred / R.I. Nigmatulin. – M.: Nauka, 1987. – 464s.
 14. Gousthine V. Synergetychna koncepcija opracowywania nowych instalacji transport pneumatycznego dla przemyslu odlewniczego / V. Gousthine // nowoczesne odlewnicze. – Ochrona srodowiska, III miedzyna, rodnova konferengja. Krakow, 7-9 wrzsnia, 2000. – P. 69-76.
 15. Dmitrienko D. Modeling the motion of particles in the pneumatic transport mills / D. Dmitrienko, S. Lenich // Teca Kom. of Mot. and Energ. in Arg. – 2012, Vol. 12, № 3, P.19-23/
 16. Nechaev G.I. Modelyuvannya ruhu chastinok vugillya v pnevmotransportnye podriblival'nih ustanovkah / G.I. Nechaev, D.V. Dmitrienko, S.V. Lenich // // Visnik Shidnoukrains'kogo nac. un-tu im. V. Dalja. – 2012. - №9(180) chastina 1. – S. 71 – 76.
 17. Guschin V.M. Nova koncepcija ta її realizacija v rozrobkah visokoeffektivnih zasobiv pnevmatichnogo transportuvannya sipuchih materialiv / V.M. Guschin // Mashinoznavstvo, 2000, №2 (23). – S. 39-43.
 18. Guschin V.M. Analiz rejimov dvijeniya aerosmesej v pnevmotransportnom truboprovode / V.M. Guschin // Visnik donbas'koï derjavnoï mashinobudivnoyi akademiyi. Zb. Nauk. Prac'. – Kramators'k, 2010. - №1 (18). – S. 78-83.
 19. Guschin V.M. Intensifikacija processov pnevmaticheskogo transportirovaniya sypuchih materialov / V.M. Guschin // Promislova gidravlika i pnevmatika. – 2004. - №2 (4). – S. 29-32.
 20. Guschin V.M. Upravlenie i intensifikacija processov pnevmaticheskogo transportirovaniya sypuchih materialov strujnym vozdeystviem vozdušnogo potoka / V.M. Guschin, O.V. Guschin // Teoriya i praktika budivnictva. – 2009. - №5. – S. 6-15.
 21. Guschin V.M. Upravlenie dvijeniem aerosmesej v pnevmotransportnom truboprovode strujnym vozdeystviem vozdušnogo potoka / V.M. Guschin // Promislova gidravlika i pnevmatika. – 2006. - №4 (10). – S. 21-25.
 22. Haken G. Informaciya i samoorganizaciya: makroskopicheskij podhod k slojnym sistemam / G. Haken // Per. sangl. – M.: Nauka, 1991. – 204s.
 23. Berje P. Poryadok v haose. O deterministskom podhode k turbulentnosti / P. Berje, I. Pomo, K. Vidal'. – M.: Mir, 1991. – 368s.
 24. Guschin V.M. Novye pnevmotransportnye ustanovki dlya peremesceeniya sypuchih materialov / V.M. Guschin // Zb. nauk. prac'. Girnichi, budivel'ni, dorojni ta meliorativni mashini. – K.: Vip. 55, 2000. – S. 70-74.
 25. Abramovich N.G. Teoriya turbulentnyh struj / N.G. Abramovich. – M.: Gl. red. fiz-mat. lit-ry., 1984. – 716s.
- Гущин О.В., Чернецкая-Белецкая Н.Б. Вдосконалення пневмотранспорту сипких матеріалів на основі синергетичної концепції.**
- Процеси взаємодії повітряного потоку з сипким матеріалом, що рухається у пневмотранспортному трубопроводі, розглядаються на основі синергетичної концепції. Вдосконалення та розробка новітніх вискоефективних енергозберігаючих засобів пневматичного транспортування сипких матеріалів виконується з використанням структурованих режимів руху аеросумішей. Розглянуто біфуркаційні процеси, які мають місце у пневмотранспортному трубопроводі і особливості формування та руху структурованих режимів течії аеросумішей.*
- Ключові слова:** пневмотранспорт, аеросуміш, синергетика, повітряний потік, сипкий матеріал.
- Gushchin O., Chernetskaya-Beletskaya N. Improvement of pneumotransport of bulks on the basis of the synergetic concept.**
- Processes of interaction of a moving air stream with moved bulks in the pneumotransportny pipeline are considered on the basis of the synergetic concept. Improvement and development of new highly effective energy saving ways of pneumatic transportation of bulks is carried out with use of the structured modes of movement of aero mixes. Bifurcation processes proceeding in the pneumotransport pipeline are considered, formation and features of the structured modes of a current aerosme-sow.*
- Improving the technical performance of pneumatic intensification of mass transfer is achieved through the use of structure-tered driving modes fuel mixture, ie, wave and a la carte.*
- Keywords:** pneumotransport, aero mix, synergetrics, air stream, bulk.
- Гущин О.В.** – к.т.н., докторант СХУ ім. В. Даля.
e-mail: app@dgma.donetsk.ua
- Чернецка-Білецька Н.Б.** – д.т.н., проф., зав. кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СХУ ім. В. Даля.
- Рецензент: д.т.н., проф. Соколов В.І.