

К РАСЧЕТУ ВОЗДУХОВОДОВ ДЛЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

В. А. Минко, Т. Н. Ильина, А. В. Минко, Д. А. Емельянов

*Кафедра теплогасоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»,
г. Белгород, Россия; ilina50@rambler.ru*

Ключевые слова: дисперсная фаза; коэффициент гидравлического трения; потери давления; расходная концентрация; скорость витания; техногенные материалы.

Аннотация: Предложен дискретный метод расчета потерь давления с учетом дисперсного состава, концентрации и плотности твердых частиц. Полученные аналитическим путем уравнения подтверждены экспериментальными исследованиями. Показана возможность использования полученного уравнения для техногенных волокнистых материалов на основе картона в диапазоне концентраций до $\mu = 0,5$.

Введение

В настоящее время в России намечены масштабные задачи по увеличению жилого и автодорожного строительства. При этом важное значение имеет разработка ограждающих конструкций с повышенными теплотехническими показателями. Наибольшее распространение в строительстве получили различные теплоизоляционные бетоны как газонаполненные (пенобетон, газобетон), так и на основе легких заполнителей (керамзитобетон, перлитобетон, полистиролбетон и др.). Особая роль в деле производства теплоизоляционных материалов отводится малотоннажным технологическим комплексам (МТК), использующим традиционные и различные техногенные материалы, такие как уловленная пыль производства вспученного перлитового песка, цементного клинкера и др.

В дорожном строительстве современных автомобильных дорог наиболее перспективным материалом является щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА). Основной структурообразующий компонент ЩМА – гранулированная стабилизирующая добавка (ГСД), выполняющая функции фиброагента, состоящего в основном из целлюлозно-бумажных отходов (ЦБО) [1, 2].

Анализ технологических процессов МТК показал, что при производстве поризованных композиционных материалов используются различные тонкоизмельченные полидисперсные материалы (перлит, полистирол, распушенный картон и др.), что требует применения, с экологической и экономической точек зрения, закрытых видов транспорта (пневмотранспорт). Методы расчета трубопроводов для таких материалов в настоящее время не достаточно разработаны.

Анализ существующих подходов к гидравлическому расчету трубопроводов при движении двухфазных потоков малых концентраций

Основным энергетическим показателем, определяющим в значительной степени эффективность установки и систем в целом, являются потери давления в трубопроводе на определенном участке.

Основная особенность пневмотранспортных систем в условиях производства теплоизоляционных материалов – использование их с низкими значениями истинной плотности $\rho_t < 800 \text{ кг/м}^3$ и, как следствие, малыми концентрациями $\mu < 0,5 \text{ кг}_t/\text{кг}_в$. С другой стороны, использование в схемах трубопроводов с небольшими диаметрами $d < 100...150 \text{ мм}$ выдвигает ряд требований при расчетах данных систем, а именно учета массовой μ и объемной ϵ_t концентраций дисперсной фазы (твердого вещества) в материально-воздушной смеси.

Учет концентрации твердой фазы в двухфазных потоках при транспортировании сыпучих материалов позволил адекватно описать процесс транспортирования заполнителей в МТК, имеющий существенные отличия от изученных ранее процессов, возникающих при эжекции сыпучим материалом [3, 4].

Методы решения основной задачи пневмотранспортирования (определение потерь давления) основываются на расчетных уравнениях, включающих опытные коэффициенты, функции которых не определены. Числовые значения их у разных авторов различны, что может быть объяснено сложностью физических явлений, протекающих при пневмотранспортировании, трудностью аналитического расчета, различием в методике проведения опытов, различными физическими свойствами частиц и другими причинами [5].

Расчетам по определению потерь давления в пневмотранспортных трубопроводах при производстве теплоизоляционных материалов должны предшествовать экспериментальные измерения на специально созданных установках или аналогичных действующих системах.

При разработке методов расчета потерь давления в трубопроводах, выполненных в БГТУ им. В. Г. Шухова, был использован дискретный метод или метод траекторий. Расчет потерь давления осуществлялся для каждой фракции, затем выполнялось суммирование по всем фракциям (метод суперпозиций). Следует отметить, что методы расчета, основанные на аналитических решениях траекторий движения частиц, имеют ряд преимуществ перед эмпирическими методами, использование которых в условиях, отличных от условий их получения, требует соответствующего обоснования их адекватности [6, 7].

Для реализации предлагаемого подхода необходимо решить уравнение движения частиц взвешенного в потоке материала при известном поле скоростей несущей фазы. Поле скоростей может быть получено на основании существующих эмпирических зависимостей для распределения скоростей движения потока по сечению канала.

Модель движения дискретной частицы в газовом потоке получена в виде

$$m \frac{d\bar{U}}{dt} = \sum \bar{F}_i, \quad (1)$$

где m – масса частицы; \bar{U} – вектор скорости движения частицы;

$$\sum \bar{F}_i = \bar{F}_{c.c} + \bar{F}_M + \bar{F}_C + \bar{m}g, \quad (2)$$

$\sum \bar{F}_i$ – сумма действующих на частицу сил; $\bar{F}_{c.c}$, \bar{F}_M , \bar{F}_C – сила сопротивления среды, Магнуса и Сафмена соответственно.

Интенсивное вращение частиц, как и наличие значительных градиентов скорости газа в пристенных областях, вызывает необходимость рассмотрения уравнения, описывающего изменение угловой скорости частиц.

Математическая модель движения частицы в газовом потоке принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{U}; \\ \frac{d\vec{U}}{dt} = -\frac{C_d \text{Re}}{24\tau}(\vec{U} - \vec{v}) + \vec{g} + \vec{a}_M + \vec{a}_C; \\ \frac{d\vec{\omega}}{dt} = -\frac{10}{3\tau}(\vec{\omega} - \vec{\omega}_r), \end{cases} \quad (3)$$

где C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления; $\text{Re} = \frac{d\rho_T}{\eta}|\vec{U} - \vec{v}|$ –

число Рейнольдса для частицы; $\tau = \frac{d^2\rho_T}{18\mu}$ – время релаксации частицы; \vec{v} – вектор

скорости газа; \vec{g} – вектор ускорения силы тяжести; $\vec{a}_M = \frac{3\rho_r}{4\rho_\tau}\vec{\omega}_x(\vec{U} - \vec{v})$,

$\vec{a}_C = \frac{3,2}{\pi}\sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_\tau\tau(\vec{\omega}g)}}(\vec{U} - \vec{v})$ – ускорение силы Магнуса и Сафмена соответственно;

$\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения частицы; $\vec{\omega}_r$ – мгновенная угловая скорость вращения газа в данной точке.

В результате численного решения для каждой конкретной фракции полидисперсного материала в БГТУ им. В. Г. Шухова разработана методика аналитического расчета потерь давления для различных частиц материала [8].

Для разработки методики расчета потерь давления в трубопроводах при транспортировке полистирола составлено уравнение прямой. Потери давления ΔP могут быть представлены как

$$\Delta P_{\text{полист}} = (P_0 + P_{2\phi}) = P_0 + \frac{(62\mu + 2,8)}{0,35}x_1, \quad (4)$$

где $P_{2\phi}$ – дополнительные потери, вызванные наличием двухфазного потока в трубопроводе; P_0 – потери давления при движении чистого воздуха; x_1 – поправочный коэффициент между экспериментальными и аналитическими данными для полистирола ($x_1 = 1,22$), выражение $P_{2\phi}$ получено как уравнение прямой.

Для условий транспортирования перлита получена зависимость

$$\Delta P_{\text{перл}} = (P_0 + P_{2\phi}) = P_0 + \frac{(540\mu + 6)}{0,15}x_2, \quad (5)$$

где x_2 – поправочный коэффициент между экспериментальной и аналитической прямыми для перлита ($x_2 = 1,25$).

Для данного вида материала не представляется возможным выполнить ситовой анализ, практически нет и отдельных фракций материала, что является особенностью в исследованиях потерь давления измельченного картона. Выполнены экспериментальные измерения потерь давления ΔP при различных концентрациях μ , подобран средний размер частиц распушенного картона (так называемый условный диаметр $d_{\text{усл}}$) и рассчитана аналитическая зависимость.

Для условий транспортирования распушенного картона получена зависимость

$$\Delta P_{\text{карт}} = (P_0 + P_{2\phi}) = P_0 + \frac{(112\mu + 1,2)}{0,15}. \quad (6)$$

Расчет составляющих в уравнениях, как правило, представляет определенные трудности, поэтому наиболее представительными являются результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования

Для подтверждения полученных аналитических зависимостей проведены аэродинамические исследования двухфазных систем на установке, представленной на рис. 1. В качестве дисперсных материалов использованы перлит $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, полистирол $\rho = 330 \text{ кг/м}^3$ и распушенный картон $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$.

При проведении экспериментальных исследований процесса пневмотранспортирования непосредственному измерению подлежали следующие параметры: барометрическое давление воздуха; температура воздуха в зоне всасывания в систему трубопроводов; относительная влажность воздуха; статическое давление воздушного потока в начале и конце контрольного участка исследуемого трубопровода; расход воздуха, проходящего через исследуемый трубопровод; насыпная плотность материала; масса материала отдозированного за время проведения серии экспериментов; время прохождения материала по трубопроводу.

Исходя из данных параметров, вычислялась величина сопротивления двухфазному потоку. Масса материала, поданного в поток за время проведения серии экспериментов, определялась в зависимости от тарировочной шайбы в бункере для подачи материала. Время эксперимента составляло 0...30 мин. Результаты экспериментов приведены на рис. 2.

Потери давления в трубопроводах при транспортировке материалов записывают в виде

$$\Delta P = P_0(1 + k\mu), \quad (7)$$

где P_0 – потери давления дисперсионной среды (воздуха); k – опытный коэффициент, зависящий от основных характеристик двухфазного потока.

На основе экспериментальных данных получены значения k , которые составили для перлита $k = 245$, картона $k = 80$ и полистирола $k = 15$. Очевидно что, наиболее интенсивный рост потерь давления наблюдается для систем с перлитом. Следует отметить, что в настоящей работе использована тонкодисперсная улов-

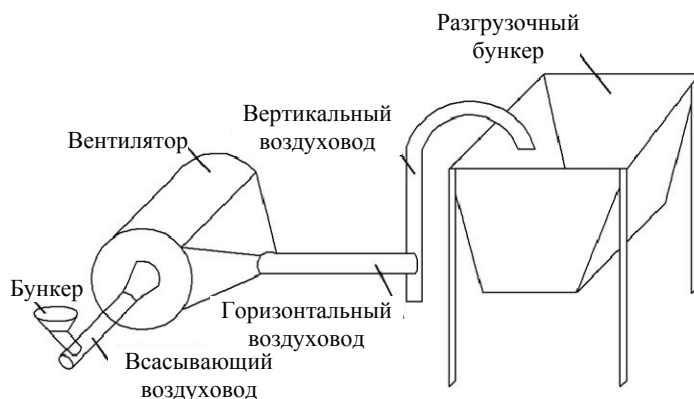


Рис. 1. Схема трубопроводов для подачи поризованных материалов

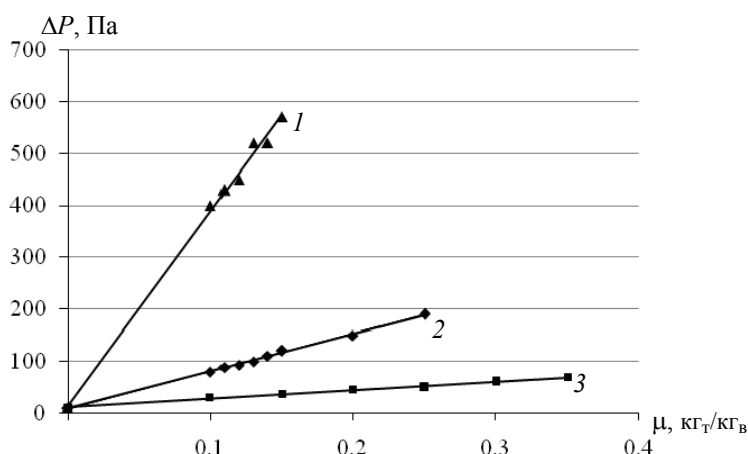


Рис. 2. Зависимость потерь давления ΔP от массовой концентрации материала μ в воздуховоде:
 1 – перлит; 2 – картон; 3 – полистирол

ленная пыль перлитового производства, которая имеет высокую удельную поверхность (более $6000 \text{ м}^2/\text{кг}$), низкую насыпную плотность ($\rho_{\text{нас}} < 200 \text{ кг}/\text{м}^3$) и игольчатую форму частиц. Совокупность физико-механических параметров обуславливает преобладание потерь давления за счет удара жестких ($\rho_{\text{T}} = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$) частиц о стенки трубопровода, а также их аутогезионного взаимодействия, обусловленного высокой поверхностной активностью совокупности частиц.

Частицы картона и полистирола относятся к пористым легким материалам $\rho_{\text{нас}} = 20 \dots 40 \text{ кг}/\text{м}^3$. Причем форма частиц измельченного картона значительно отличается от шарообразной, коэффициент формы составляет 3 – 5 [9]. Подобные результаты по скорости витания и коэффициенту формы частиц получены при исследовании волокнистых материалов [10].

В БГТУ им. В. Г. Шухова спроектирован и изготовлен малотоннажный технологический комплекс для производства экструдированных техногенных материалов различного функционального назначения (ГСД ЩМА, топливных пеллет, органоминеральных удобрений, теплоизоляционных наполнителей и др.). Основное предназначение комплекса – создание гранулированных стабилизирующих добавок для ЩМА [11].

Одной из основных частей данного комплекса является система пневмотранспорта измельченных волокнистых материалов. Для улавливания частиц материалов после дробилки и подачи их в гранулятор в комплексе используется циклон-разгрузитель с диаметром корпуса 675 мм и рукавный фильтр Mini-4000 (рис. 3).

При эксплуатации комплекса установлено, что массовая концентрация измельченного картона составляет $\mu = 0,4 \dots 0,5$ на участке 1 и $\mu = 0,1 \dots 0,15$ на участке 2. Уравнение для картона $\Delta P = P_0(1 + 80\mu)$ использовано для расчета потерь давления на участке 2 с низкой концентрацией твердой фазы, которые составили $\Delta P_2 = 50 \dots 60 \text{ Па}$, где $P_0 = 5 \text{ Па}$.

Для проверки возможности использования уравнения систем с большей концентрацией твердой фазы значение коэффициента k получено путем решения обратной задачи при известном значении потерь давления на участке 1. Расчет показал, что значения коэффициента составляют $k = 80 \pm 2$, потери давления – $\Delta P_1 = 2900 \dots 3100 \text{ Па}$, где $P_0 = 95 \text{ Па}$.

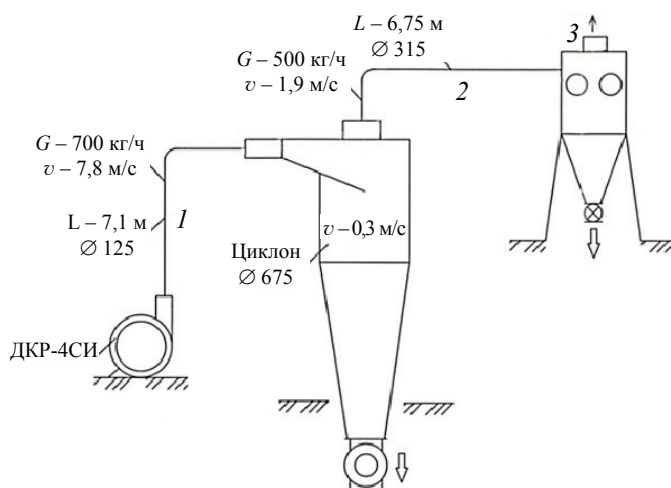


Рис. 3. Схема системы пневмотранспорта малотонажного комплекса для производства экструдированных техногенных материалов

Таким образом, полученный экспериментальным путем коэффициент k для волокнистых материалов в диапазоне $\mu = 0,1 \dots 0,3$, может быть использован и для расчета потерь давления в системах с более высокой концентрацией дисперсной фазы (до $\mu = 0,5$).

Заключение

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования аэродинамических двухфазных потоков показали, что потери давления прямо пропорциональны концентрации твердой фазы для волокнистых частиц с низкой насыпной плотностью: полистирола, перлита, картона. Причем, чем выше значение истинной и насыпной плотности, тем больше значение коэффициента пропорциональности в уравнении потерь давления от концентрации. На основании полученных результатов разработана методика и произведен расчет потерь давления в воздуховодах малотоннажного технологического комплекса для производства экструдированных техногенных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и правительства Белгородской области в рамках научного проекта № 14-41-08054 р_офи_м.

Список литературы

1. Техника и технология комплексной утилизации целлюлозно-бумажных отходов / В. С. Севостьянов [и др.] // Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии», 14 – 19 июня 2011 г. – Пенза : Изд-во Пенз. ГТУ, 2011. – С. 152 – 156.
2. Технологические модули для комплексной переработки техногенных материалов / С. Н. Глаголев [и др.] // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 9. – С. 43 – 45.
3. Гастерштадт, И. Пневматический транспорт / И. Гастерштадт. – Л. : Северо-Западное промбюро, 1927. – 119 с.
4. Клячко, Л. С. Аналитический метод учета потери давления в трубопроводе с потоками, несущими твердую дисперсную фазу / Л. С. Клячко // Сб. тр. ВНИИ-ГИС. – 1970. – № 28. – С. 125 – 127.

5. Минко, В. А. Обеспыливающая вентиляция : монография / В. А. Минко, И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2006. – Т. 1. – 460 с.
6. Шаптала, В. Т. Численное моделирование процесса переноса мелкодисперсных материалов в трубопроводах систем вакуумной пылеуборки / В. Т. Шаптала, Ю. А. Феоктистов, А. Ю. Феоктистов // Сб. материалов Всерос. студен. олимпиады, науч.-практ. конф. и выст. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиц. и возобновляемые источники энергии», 3 – 7 дек. 2001 г., Екатеринбург / Ураль. гос. техн. университет-УПИ. – Екатеринбург : Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. – С. 137 – 139.
7. Шаптала, В. Т. Расчет потерь давления при движении запыленных потоков в пневмотранспортных трубопроводах / В. Т. Шаптала, Ю. А. Феоктистов, А. Ю. Феоктистов // Тр. НГАСУ. – Новосибирск : Изд-во НГАСУ, 2002. – Т. 5, № 1 (16). – С. 72 – 75.
8. Обеспыливающая вентиляция : монография / В. А. Минко [и др.]. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2010. – Т. 2. – 568 с.
9. Емельянов, Д. А. О влиянии объемной концентрации техногенных волокнистых материалов на коэффициент формы частиц в материально-воздушном потоке / Д. А. Емельянов, К. В. Плотников // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 3. – С. 91 – 95.
10. Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / Р. Х. Мухутдинов [и др.] ; под ред. Н. С. Амирова. – Уфа : Реактив, 2001. – 347 с.
11. Технологические комплексы и оборудование для переработки техногенных материалов / С. Н. Глаголев [и др.] // Вестн. Казан. технолог. университета. – 2012. – Т. 15, № 10. – С. 198 – 200.

Calculation of Ducts for Two-Phase Flows

V. A. Minko, T. N. Pyina, A. V. Minko, D. A. Emelyanov

Department of Heat and Ventilation, Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia; ilina50@rambler.ru

Keywords: coefficient of hydraulic friction; dispersed phase; expenditure concentration; man-made materials; pressure loss; terminal velocity.

Abstract: The paper proposes a method for calculating the discrete pressure losses, taking into account the particulate composition, concentration and density of solids. The resulting equations were analytically confirmed by experimental studies. The possibility of using the equation obtained for fiber man-made materials based on cardboard in the concentration range up to $\mu = 0.5$ is shown.

References

1. Sevost'yanov V.S., Makridin A.A., Sevost'yanov M.V., Shinkarev L.I. [Technique and technology of complex recycling pulp and waste paper], *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Problemy stroitel'stva, inzhenernogo obespecheniya, blagoustroystva i ekologii"* [International Scientific-Practical Conference], 14-19 June 2011, Penza: Izd-vo PGU, 2011, pp. 152-156. (In Russ.)

2. Glagolev S.N., Sevost'yanov V.S., Il'ina T.N., Ural'skii V.I. [Process modules for complex processing of technogenic materials], *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering], 2010, no. 9, pp. 43-45. (In Russ.)
3. Gastershtadt I. *Pnevmaticheskii transport* [Air transport], Leningrad: Severo-Zapadnoe prombyuro, 1927, 119 p. (In Russ.)
4. Klyachko L.S. [Analytical method of accounting for the pressure drop in the pipeline with the flow carrying the solid dispersed phase], *Sbornik trudov VNIIGIS* [Collection VNIIGIS works], 1970, no. 28, pp. 125-127. (In Russ.)
5. Minko V.A., Logachev I.N., Logachev K.I. *Obespylivayushchaya ventilyatsiya : monografiya* [Dedusting ventilation: Monograph], Belgorod: Izd-vo BGTU, 2006, vol. 1, 460 p. (In Russ.)
6. Shaptala V.T., Feoktistov Yu.A., Feoktistov A.Yu. [Numerical simulation of the migration process of fine materials in pipelines vacuum dust cleaning systems], *Sbornik materialov Vserossiiskoi studencheskoi olimpiady, nauchno-prakticheskoi konferentsii i vystavki studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Energo- i resursosberezhenie. Netraditsionnye i vobnovlyayemye istochniki energii"* [Collected materials of All-Russian student competition, the scientific and practical conference and exhibition of students and young scientists], 3-7 December 2001, Ekaterinburg, Ural'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet-UI, Ekaterinburg: Izd-vo UGTU-UI, 2001, pp. 137-139.
7. Shaptala V.T., Feoktistov Yu.A., Feoktistov A.Yu. [Calculation of pressure loss when driving in dusty flows pneumatic pipes], *Trudy NGASU* [Proceedings NSABU], Novosibirsk: Izd-vo NGASU, 2002, vol. 5, no. 1 (16), pp. 72-75. (In Russ.)
8. Minko V.A., Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Shumilov R.N., Il'ina T.N., Staroverov S.V., Feoktistov A.Yu., Feoktistov Yu.A., Shaptala V.G., Minko A.V., Alifanova A.I., Gol'tsov A.B., Kireev V.M., Popov E.N., Seminenko A.S. *Obespylivayushchaya ventilyatsiya : monografiya* [Dedusting ventilation: monograph], Belgorod: Izd-vo BGTU, 2010, vol. 2, 568 p. (In Russ.)
9. Emel'yanov D.A., Plotnikov K.V. [On the influence of volumetric concentration of man-made fiber materials in the form factor of the particles in the material and air flow], *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Herald BSTU. Shukhov], 2016, no. 3, pp. 91-95. (In Russ.)
10. Mukhutdinov R.X., Amirov R.Ya., Al'meev L.E., Khannanov M.M., Amirova N.S. *Effektivnost' vnedreniya vikhrevykh apparatov (primenitel'no k neftekhimicheskim proizvodstvam)* [The effectiveness of the introduction of vortex units (with regard to petrochemical industries)], Ufa: Reaktiv, 2001, 347 p. (In Russ.)
11. Glagolev S.N. Sevost'yanov V.S. Sverguzova S.V. Shaikhiev I.G. Ural'skii V.I. Sevost'yanov M.V. Fetisov D.D. Shinkarev L.I. [Technological systems and equipment for processing of man-made materials], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2012, vol. 15, no. 10, pp. 198-200. (In Russ.)

Zur Berechnung der Luftkanäle für die zweiphasigen Ströme

Zusammenfassung: Es ist die diskrete Methode der Berechnung der Verluste des Drucks unter Berücksichtigung der dispersen Zusammensetzung, der Konzentration und der Dichte der festen Teilchen angeboten. Die vom analytischen Weg bekommenen

Gleichungen sind von den experimentalen Untersuchungen bestätigt. Es ist die Möglichkeit der Nutzung der bekommenen Gleichung für die Technogenfaserstoffe aufgrund der Pappe im Umfang der Konzentrationen bis zu $\mu = 0,5$ gezeigt.

Sur le calcul des gaines d'air pour les flux à deux phases

Résumé: Est proposée une méthode discrète de calcul des pertes de la pression compte tenu de la composition de dispersion, de la concentration et de la densité des particules solides. Les équations reçues de la façon analytique sont confirmés par des études expérimentales. Est montrée la possibilité d'utiliser l'équation obtenue pour les matériaux technogènes en fibres à base de carton dans la gamme de concentration jusqu'à $\mu = 0,5$.

Авторы: *Минко Всеволод Афанасьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры теплогасоснабжения и вентиляции; *Ильина Татьяна Николаевна* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплогасоснабжения и вентиляции; *Минко Александр Всеволодович* – инженер кафедры теплогасоснабжения и вентиляции; *Емельянов Дмитрий Александрович* – аспирант кафедры теплогасоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

Рецензент: *Сулейманова Людмила Александровна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительства и городского хозяйства, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.
