

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый устойчивый алгоритм вычисления приближенного решения ИУФ1, на основе вариационного принципа (8), (11) с учетом (13). Показана его эффективность в сравнении с методом регуляризации Тихонова, а также устойчивость к влиянию погрешностей регистрации отклика.

Алгоритм не использует априорных предположений о входном воздействии, или уровне шума в отклике. Это отличает его от большинства других методов, в частности метода Тихонова, в котором на основании априорных предположений ищется параметр регуляризации α .

Библиографический список

1. Алексидзе, М. А. Фундаментальные функции в приближенных решениях граничных задач [Текст] / М. А. Алексидзе. – М. : Наука, 1991. – 352 с.
2. Смирнов, В.И. Курс высшей математики [Текст] / В.И. Смирнов. – М. : Наука, 1974. – Т.4, ч.1. – 336 с.
3. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач [Текст] / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1979. – 285 с.
4. Жилияков, Е. Г. О вычислении приближенных решений интегральных уравнений Фредгольма первого рода с использованием эмпирических данных [Текст] / Е. Г. Жилияков // Дифференциальные уравнения. – 2003. – № 7.
5. Жилияков, Е. Г. О восстановлении сигналов [Текст] / Е. Г. Жилияков // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47, № 1. – С. 1-6.
6. Ректорис, К. Вариационные методы в математической физике и технике [Текст] / К. Ректорис. – М. : Мир, 1985. – 589 с.
7. Верлань, А. Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы [Текст] : справ. пособие / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. – Киев : Наук. думка, 1986. – 541 с.

УДК 628.511:51.001.57

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В ПЫЛЕУБОРОЧНЫХ НАСАДКАХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ВАКУУМНОЙ ПЫЛЕУБОРКИ

К. И. Логачев, С. В. Староверов, А. Ю. Феоктистов

ВВЕДЕНИЕ

Удаление осевшей пыли и просыпи на предприятиях стройматериалов осуществляют системы централизованной вакуумной пылеуборки (ЦПУ), имеющие высокую производительность и хорошие санитарно-гигиенические характеристики. Однако их широкому распространению препятствуют сложности с расчетом и проектированием элементов этих систем, что отрицательно сказывается на эффективности, экономичности и надежности работы установок в целом. Наибольшие сложности возникают с расчетом и проектированием пылеуборочных насадков, что обусловлено недостаточной изученностью рабочего процесса эвакуации частиц с убираемой поверхности и отсутствием достаточных теоретических обоснований выбора параметров основных конструктивных элементов насадков, влияющих на эффективность процесса уборки.

Целью настоящей работы является разработка математической модели и алгоритма ее численной реализации для расчета пылегазовых потоков в насадках систем вакуумной пылеуборки, а также рекомендаций по проектированию пылеуборочных насадков систем ЦПУ.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПЫЛЕГАЗОВОГО ПОТОКА В НАСАДКЕ

Аэродинамическое поле внутри насадка определялось методом граничных интегральных уравнений [1] для плоских потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости.

При расчете траекторий движения пылевых частиц в полости насадка и потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок предполагалось следующее: столкновениями частиц между собой и их влиянием на распределение скорости в полости насадка пренебрегаем, что справедливо для двухфазных потоков с массовой концентрацией твердой фазы $\mu < 5...7$ кг/м³, характерных для систем ЦПУ [3]; разрушение частиц при столкновении с твердыми стенками не происходит; затраты энергии на транспортирование материала складываются из затрат энергии на транспортирование отдельных частиц, т. е. общие потери давления на транспортирование твердой фазы через насадок складываются из потерь давления на транспортирование каждой фракции; затраты энергии на транспортирование твердой фазы идут на восстановление скорости частиц после соударений со стенками насадка и убираемой поверхностью.

На частицу, движущуюся в потоке воздуха в полости насадка, действует целый комплекс сил, но как показал вычислительный эксперимент, основное влияние на движение частицы оказывают силы тяжести, аэродинамического сопротивления и Магнуса.

Сила аэродинамического сопротивления газовой среды выражается следующим равенством:

$$F_D = C_D A \rho_g \frac{g_{\text{обт}}^2}{2}, \quad (1)$$

где A – площадь Миделева сечения, м²; $g_{\text{обт}}$ – скорость обтекания, м/с;
 C_D – коэффициентом сопротивления среды, который зависит от числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho_g |\bar{g} - \bar{U}| d}{\eta}, \quad (2)$$

где d – диаметр частицы, м; $-\bar{U}$ – вектор скорости частицы, м/с; \bar{g} – вектор скорости воздуха; ρ_g , η – соответственно плотность, вязкость газового потока.

Для расчета коэффициента сопротивления использовали формулу Адамова, которая применима в широком диапазоне изменения значений числа Рейнольдса и дает хорошую сходимость с результатами экспериментов:

$$C_D = (24/\text{Re}) \cdot (1 + 0,065 \text{Re}^{2/3})^{1,5}. \quad (3)$$

В потоке газа с неравномерным распределением скоростей течения частица может совершать вращательное движение относительно собственного центра масс. В этом случае на частицу действует сила Магнуса \bar{F}_M :

$$\bar{F}_M = 1/8 \pi d^3 \rho_g (\bar{g} - \bar{U}) \omega_k, \quad (4)$$

где ω_k – угловая скорость вращения частицы в потоке газа.

Движение частицы в пылеуборочном насадке описывается следующей системой уравнений:

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПЫЛЕГАЗОВОГО ПОТОКА В НАСАДКЕ

Аэродинамическое поле внутри насадка определялось методом граничных интегральных уравнений [1] для плоских потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости.

При расчете траекторий движения пылевых частиц в полости насадка и потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок предполагалось следующее: столкновениями частиц между собой и их влиянием на распределение скорости в полости насадка пренебрегаем, что справедливо для двухфазных потоков с массовой концентрацией твердой фазы $\mu < 5...7 \text{ кг/м}^3$, характерных для систем ЦПУ [3]; разрушение частиц при столкновении с твердыми стенками не происходит; затраты энергии на транспортирование материала складываются из затрат энергии на транспортирование отдельных частиц, т. е. общие потери давления на транспортирование твердой фазы через насадок складываются из потерь давления на транспортирование каждой фракции; затраты энергии на транспортирование твердой фазы идут на восстановление скорости частиц после соударений со стенками насадка и убираемой поверхностью.

На частицу, движущуюся в потоке воздуха в полости насадка, действует целый комплекс сил, но как показал вычислительный эксперимент, основное влияние на движение частицы оказывают силы тяжести, аэродинамического сопротивления и Магнуса.

Сила аэродинамического сопротивления газовой среды выражается следующим равенством:

$$F_D = C_D A \rho_g \frac{\mathcal{G}_{\text{обт}}^2}{2}, \quad (1)$$

где A – площадь Миделева сечения, м^2 ; $\mathcal{G}_{\text{обт}}$ – скорость обтекания, м/с ;
 C_D – коэффициентом сопротивления среды, который зависит от числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho_g |\bar{\mathcal{G}} - \bar{U}| d}{\eta}, \quad (2)$$

где d – диаметр частицы, м ; $-\bar{U}$ – вектор скорости частицы, м/с ; $\bar{\mathcal{G}}$ – вектор скорости воздуха; ρ_g , η – соответственно плотность, вязкость газового потока.

Для расчета коэффициента сопротивления использовали формулу Адамова, которая применима в широком диапазоне изменения значений числа Рейнольдса и дает хорошую сходимость с результатами экспериментов:

$$C_D = (24/\text{Re}) \cdot (1 + 0,065 \text{Re}^{2/3})^{1,5}. \quad (3)$$

В потоке газа с неравномерным распределением скоростей течения частица может совершать вращательное движение относительно собственного центра масс. В этом случае на частицу действует сила Магнуса \bar{F}_M :

$$\bar{F}_M = 1/8 \pi d^3 \rho_g (\bar{\mathcal{G}} - \bar{U}) \omega_k, \quad (4)$$

где ω_k – угловая скорость вращения частицы в потоке газа.

Движение частицы в пылеуборочном насадке описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = U_x; & \frac{dy}{dt} = U_y; \\ \frac{dU_x}{dt} = -k_\phi \frac{C_D \text{Re}}{24\tau} (U_x - \mathcal{G}_x) + 0.75 \frac{\rho_z}{\rho_m} \omega (U_y - \mathcal{G}_y), \\ \frac{dU_y}{dt} = -k_\phi \frac{C_D \text{Re}}{24\tau} (U_y - \mathcal{G}_y) + g + 0.75 \frac{\rho_z}{\rho_m} \omega (U_x - \mathcal{G}_x), \end{cases} \quad (5)$$

k_ϕ – коэффициент формы частицы [4];

ρ_m – плотность частицы, кг/м³;

τ – время релаксации, с [1].

Интенсивное вращение частиц вызывает необходимость рассмотрения уравнения, описывающего изменение угловой скорости частиц: $\frac{d\bar{\omega}}{dt} = -\frac{10}{3\tau} (\bar{\omega} - \bar{\omega}_g)$.

Как показали вычислительный эксперимент и визуальное наблюдение за работой насадка, при движении частиц средних и крупнодисперсных фракций происходят соударения частиц со стенками пылеуборочного насадка и убираемой поверхностью. Поэтому возникает необходимость определения послеударных значений скорости частицы.

Послеударные значения составляющих скорости частицы $U_{2\tau}$, U_{2n} , $\omega_{2\tau}$ вычисляются из соотношений [5]:

$$\begin{aligned} U_{2n} &= -k \cdot U_{0n}, \\ U_{2\tau} &= U_{0\tau} + \eta \cdot f \cdot (1+k) \cdot U_{0n}, \\ \omega_{2\tau} &= \omega_{0\tau} + 5f \cdot (1+k) \cdot \frac{U_{0n}}{d}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\eta = \min \left\{ -\frac{2U_{0\tau}}{7f(1+k)U_{0n}}, 1 \right\}$; k – коэффициент восстановления при ударе ($k = 0,5$); f – коэффициент трения скольжения ($f = 0,5$); U_{0n} , $U_{0\tau}$ – нормальная и тангенциальная составляющие скорости частицы до удара; $\omega_{0\tau}$ – угловая скорость частицы до удара.

В результате неупругих соударений со стенкой насадка частица безвозвратно теряет часть своей кинетической энергии. Потеря энергии при одном соударении составляет:

$$\Delta W = \frac{m}{2} (U_1^2 - U_2^2), \quad (7)$$

где m – масса частицы, кг;

U_1 , U_2 – скорость частицы до соударения со стенкой и после, м/с.

Восстановление скорости движения частиц после удара о стенку является, как известно, одним из основных факторов, определяющих потери давления двухфазного потока в процессе его пневмотранспортирования. Оценим его величину. Работа сил давления при перемещении частиц на расстояние l равна суммарным потерям давления всех частиц на этом участке:

$$\Delta H_l \cdot S \cdot l = N \cdot \frac{1}{V} \cdot \Delta W_1, \quad (8)$$

где ΔH_l – падение давления на участке длиной l ,

ΔW_1 – потери энергии одной частицей на этом участке;

N – количество частиц, проходящих через поперечное сечение потока за 1 с:

$$N = \frac{6\mu \cdot S \cdot V \cdot \rho_2}{\pi d^3 \rho_m} \quad (9)$$

Из соотношений (8) и (9) получаем выражение для падения давления двухфазного потока:

$$\Delta H = \frac{6\mu \cdot \rho_2 \cdot \Delta W_1}{\pi \rho_m d^3}, \quad (10)$$

где ΔW_1 – усредненная величина потерь энергии частицей.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе разработанной компьютерной программы построены профили горизонтальной и вертикальной составляющих скорости воздуха в полости однополочного и двуполочного насадка (рис. 1, рис. 2), которые подтверждаются общепринятой теорией стесненного течения газов [2].

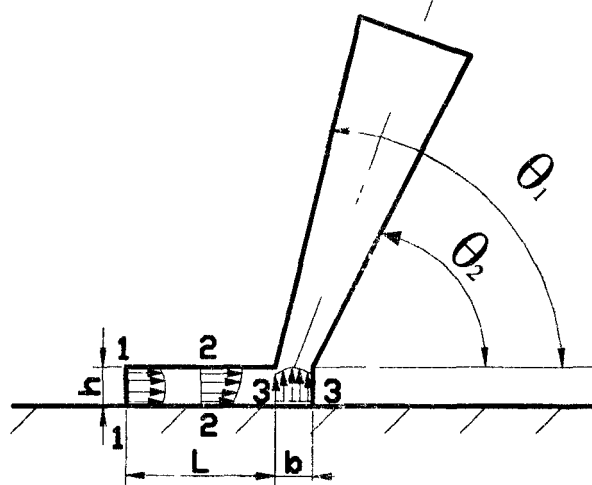


Рис. 1. Модель однополочного насадка. 1-1 – \mathcal{O}_x вход в подполочный канал; 2-2 – \mathcal{O}_x середина подполочного канала; 3-3 – \mathcal{O}_y напротив всасывающего патрубка на расстоянии 0,001 м от убираемой поверхности

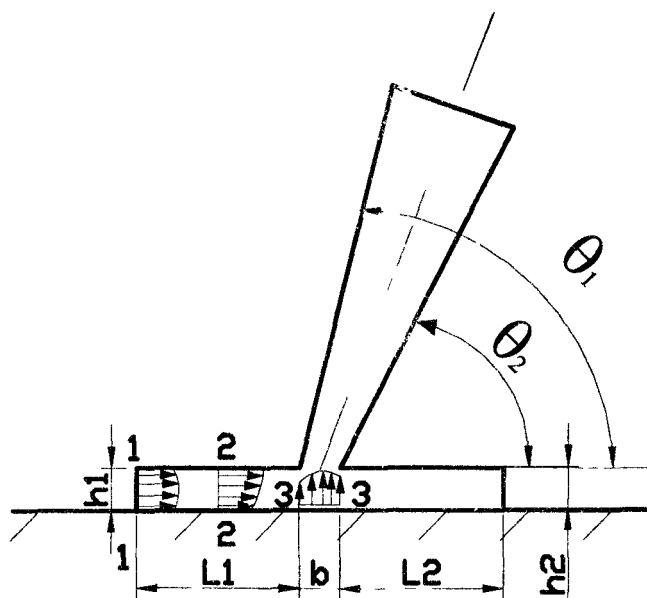


Рис. 2. Модель двуполочного насадка. 1-1 – \mathcal{O}_x вход в подполочный канал; 2-2 – \mathcal{O}_x середина подполочного канала; 3-3 – \mathcal{O}_y напротив всасывающего патрубка на расстоянии 0,001 м от убираемой поверхности.

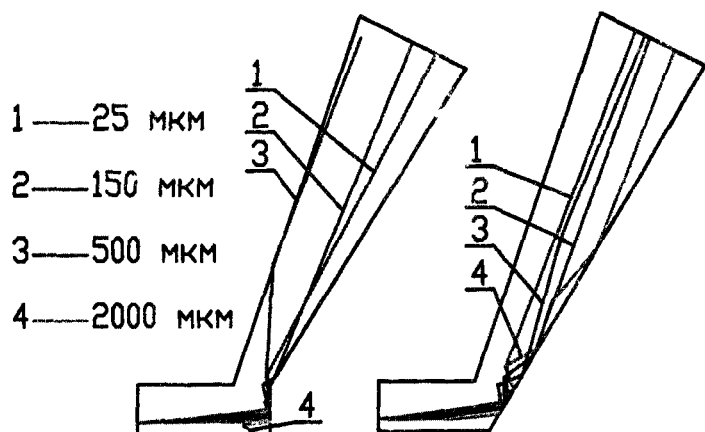
В результате вычислительного эксперимента установлено, что изменение параметров основных конструктивных элементов насадков, а именно: высоты подполочного канала, угла наклона и ширины щели всасывающего патрубка, – не оказывает существенного влияния на характер профиля скорости воздуха Q_x , в отличие от профиля Q_y , где наибольшее влияние оказывает изменение угла наклона и ширины щели всасывающего патрубка.

При изменении значений ширины щели всасывающего патрубка b в пределах 6...20 мм Q_x в подполочном канале однополочного и двуполочного насадка (фронтальный канал) имеет два локальных экстремума ($b=6, 10$ мм) и достигает наибольшего значения при $b=20$ мм. Скорость воздуха Q_x при изменении θ_1 в диапазоне от 40° до 135° принимает наибольшее значение при $\theta_1 = 95^\circ$, что является наиболее эффективным при уборке пыли. С приближением кромки полки к убираемой поверхности Q_x в подполочном пространстве однополочного насадка возрастает. В двуполочном насадке Q_x увеличивается с ростом отношения высоты фронтального канала к средней высоте каналов $E = 2h_1 / (h_1 + h_2)$.

При увеличении ширины щели b всасывающего патрубка наблюдается уменьшение вертикальной скорости потока Q_y . При увеличении высоты канала h в однополочном насадке и с ростом отношения фронтального канала к средней высоте каналов в двуполочном насадке происходит снижение вертикальной скорости Q_y . Это объясняется тем, что условия разворота потока для однополочного насадка и условия слияния потоков для двуполочного становятся менее стесненными. Влияние угла наклона всасывающего патрубка на Q_y в зоне уноса частиц носит экстремальный характер, максимальные значения в однополочном насадке скорость принимает при $\theta_1=75^\circ$, в двуполочном при $\theta_1=95^\circ$. Это объясняется меняющимся характером распределения вертикальных скоростей Q_y при различных углах наклона всасывающего патрубка пылеуборочного насадка.

Анализ построенных линий тока при различных параметрах основных конструктивных элементов показал, что существенно уменьшить область малых скоростей в двуполочном насадке не представляется возможным. В однополочном насадке зону возможного вихреобразования можно уменьшить путем придания наклона задней стенке.

Пылевые частицы размером менее 50 мкм в однополочном насадке движутся по двум траекториям: частицы менее 10 мкм движутся практически по линиям тока воздуха в полости насадка, частицы более 10 мкм после отскока от задней стенки сразу уносятся во всасывающий патрубок. Частица размером от 50 до 150 мкм при ударе о заднюю стенку отскакивает (рис. 3а), затем поток снова направляет частицу к задней стенке и так далее, пока горизонтальная скорость частицы в зоне уноса станет меньше вертикальной.



а) б)
Рис. 3. Траектории движения частиц различного диаметра в однополочном насадке: а) стандартной модели; б) с приданием угла наклона задней стенке

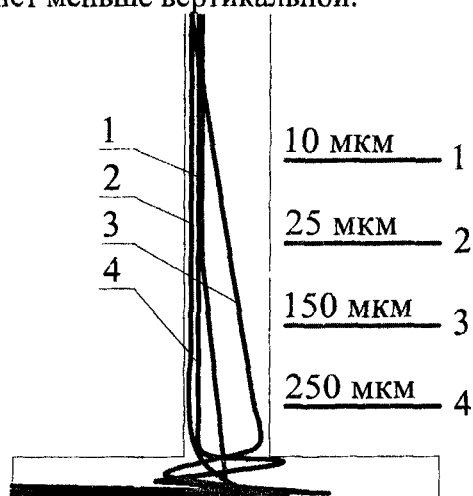


Рис. 4. Траектории движения частиц в двуполочном насадке

Частицы диаметром более 250 мкм прижимаются к задней стенке, откуда, если величина скорости воздушного потока достаточна для перекачивания и скольжения частиц данного размера по задней стенке, выносятся во всасывающий патрубок, прижимаясь к фронтальной образующей всасывающего патрубка. При придании угла наклона задней стенке (рис. 3б) в однополочном насадке увеличивается интенсивность и эффективность процесса пылеуборки.

В двуполочном насадке частицы движутся по двум основным траекториям: частицы размером менее 10 мкм движутся практически по линиям тока, частицы более 10 мкм совершают колебательное затухающее движение вдоль поверхности, по мере затухания колебаний частицы увлекаются воздушным потоком и уносятся в сборный канал (рис. 4). С увеличением размера частиц возрастает их амплитуда и число колебаний. Полученный колебательно-затухающий характер движения частиц подтверждается скоростной кино съемкой процесса движения частиц в полости насадка в условиях слияния встречных потоков [2], что говорит о качественной адекватности математической модели.

При возрастании массовой концентрации материала (рис. 5), его плотности (рис. 6) и диаметра частиц (рис. 7) увеличиваются потери давления, что связано с увеличением затрат энергии на перемещение частиц материала

Сравнение расчетных и экспериментальных значений потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок подтверждает адекватность математической модели. Расхождение не превышает 12 % (рис. 5).

При увеличении скорости в подположном пространстве насадка наблюдается увеличение потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок (рис. 8). Это объясняется тем, что частицы материала, переносимые потоком с большей скоростью, теряют больше кинетической энергии при соударении со стенками насадка, чем частицы, имеющие меньшую скорость.

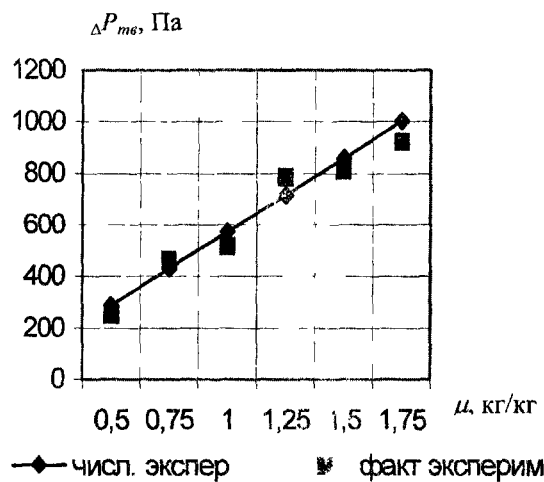


Рис. 5. Зависимость потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок от массовой концентрации μ убираемого материала в потоке

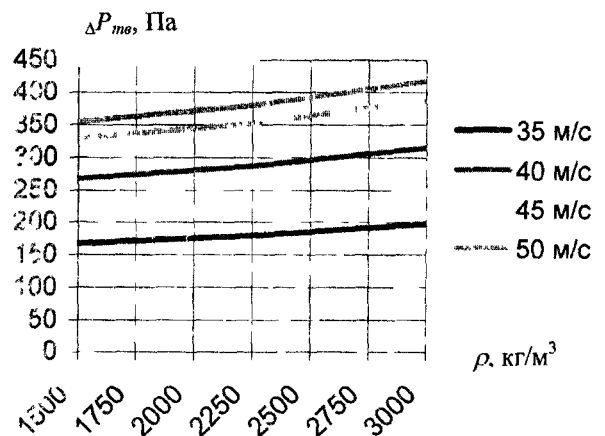


Рис. 6. Зависимость потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок от плотности убираемого материал a ($\mu=0,75$ кг/кг, $d_s=450$ мкм)

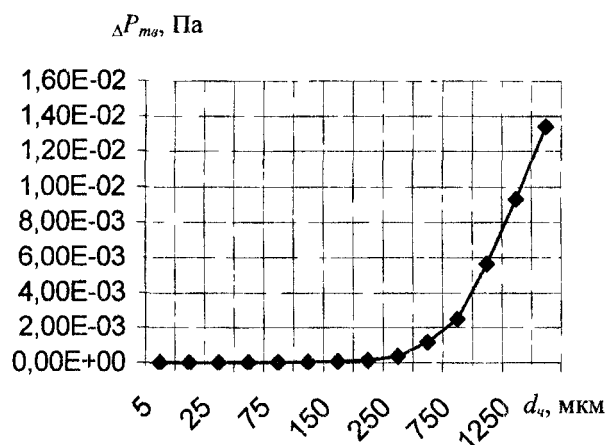


Рис. 7. Зависимость потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок от диаметра частиц убираемого материала

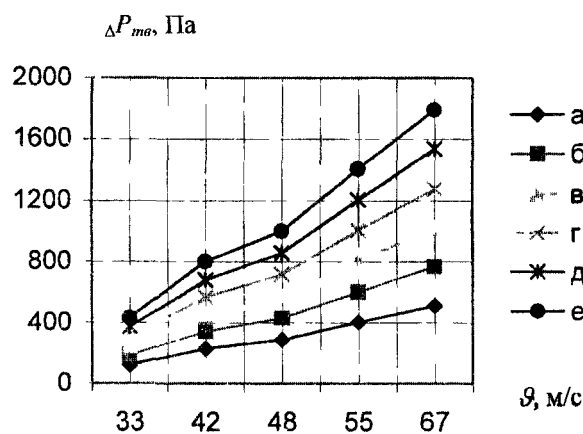


Рис. 8. Зависимость потерь давления на транспортирование твердой фазы через насадок от скорости в подполочном пространстве при μ : а – 0,5 кг/кг; б – 0,75 кг/кг; в – 1 кг/кг; г – 1,25 кг/кг; д – 1,5 кг/кг; е – 1,75 кг/кг

ВЫВОДЫ

При проектировании однополочных насадков рекомендуется: принимать ширину щели всасывающего патрубка $b=10$ мм, придавать наклон в 60° задней стенки совместно с тыльной образующей всасывающего патрубка, приближать кромки полки к убираемой поверхности (уменьшать размер h), но с учетом максимального диаметра частиц убираемого материала, длину полки L принимать не более 20 мм.

При проектировании двуполочных насадков рекомендуется: принимать ширину щели всасывающего патрубка $b=10$ мм, угол наклона всасывающего патрубка 90° , равные высоты фронтального и тыльного канала $h_1=h_2$, размер полок L_1 и L_2 не более 20 мм.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований получен патент РФ на полезную модель № 39261 от 27.07.04 «Насадок пылесоса».

Разработанная на основании математической модели методика расчета и проектирования насадков дополнила общую методику технологического и гидравлического расчета систем ЦПУ применительно к предприятиям по переработке сыпучих материалов, по которой спроектирована система ЦПУ в цехе прессов № 1 на ОАО «Семилукский огнеупорный завод».

Библиографический список

1. Логачев, К. И. Аэродинамика всасывающих факелов [Текст] / К. И. Логачев. – Белгород : Изд-во БелГТАСМ, 2000. – 175 с.
2. Курников, А. А. Пневматическая пылеуборка цехов машиностроительных заводов [Текст] / А. А. Курников, В. А. Курников. – М. : Машиностроение, 1983. – 152 с.
3. Минко, В. А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов [Текст] / В. А. Минко. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1981. – 176 с.
4. Нейков, О. Д. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков [Текст] / О. Д. Нейков, И. Н. Логачев. – М. : Металлургия, 1981. – 191 с.
5. Воробьев, Н. Д. Моделирование взаимодействия мелющего тела с футеровкой трубной мельницы [Текст] / Н. Д. Воробьев, В. С. Богданов, М. Ю. Ельцов ; МИСИ, БТИСМ // Физико-математические методы в строительном материаловедении. – М. ; Белгород, 1986. – С. 168-173.