

## ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ СОВРЕМЕННЫХ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В роботі наведено огляд результатів, виконаних в ІГТМ НАНУ теоретичних досліджень потоків «газ - тверді частки» та розроблених на їх основі нових методів розрахунку пневмотранспортних систем. Бібліогр.: 17 найм.

Повышение требований защиты окружающей среды вызывает увеличивающийся интерес к экологически чистым средствам промышленного транспорта различного назначения. Одним из таких является пневматический трубопроводный транспорт. Он обладает рядом существенных достоинств, к которым относятся простота применяемых технологических схем, малогабаритность, обеспечение транспортирования по сложным искривленным трассам, непрерывность транспортирования, возможность создания высокого уровня механизации и автоматизации технологических процессов, простота исполнения технических устройств в искро- и взрывобезопасном состоянии. Однако, несмотря на очевидные преимущества трубопроводного пневмотранспорта, его использованием в промышленности не соответствует его возможностям. Это связано с различными причинами, одной из которых является недостаточное развитие теории пневмотранспортных систем и отсутствие обоснованных инженерных методик их расчета.

Пневмотранспортное устройство характерно сравнительной простотой его частей и сложностью протекающих в нем механических процессов, для изучения которых необходимо привлечение фундаментального математического аппарата. Основным объектом, определяющим конструктивные и технологические параметры пневмотранспортного устройства, является поток двухкомпонентной смеси «газ - твердые частицы», которая представляет собой двухфазную гетерогенную среду. Механика гетерогенных сред особенно быстро развивается в последние десятилетия. Разработаны [5] и успешно применяются методы осреднения для использования математического аппарата континуальной механики при описании состояния многофазных сред. Для определения некоторых параметров твердой фазы потока актуальными являются дискретные методы динамики в частности методы молекулярной динамики и комплексные методы [17].

В ІГТМ НАН України на протязенні ряду лет проводяться широкомасштабні роботи по дослідженню пневмотранспортних процесів і створенню великої гамми пневмотранспортних пристроїв і систем.

На основе механики гетерогенных сред [5] создана теория вибропневмотранспортных машин циклического (ВПМЦ) и непрерывного (ВПМН) действия [12]. Эта теория включает в частности математическую модель двухфазного потока «газ - твердые частицы» в пневмотранспортном трубопроводе. Последняя представляет собой, полученную на базе основных законов сохранения массы, импульса и пульсационной энергии, систему дифференциальных уравнений в частных производных относительно скоростей фаз. Замыкается эта система уравнениями состояния для газа и квазигаса частиц, а также условием полноты объема. На стенках трубы используются граничные условия непротекания и условия скольжения для обеих фаз. На начальном участке трубопровода, где приложена вибрация, граничные условия учитываются потоком пульсационной энергии. Заданными являются величины расходов по обеим фазам или начальные скорости, а также начальное давление газа. Давление в конце трубопровода равно атмосферному. Рассмотрена плоская задача. С помощью алгоритма конечно-разностной аппроксимации [6] система дифференциальных уравнений сведена к системе нелинейных алгебраических уравнений, решение которой выполнено численно инерционным методом Гаусса-Зейделя [7].

Полученное решение позволило выявить следующие характерные особенности параметров потока. Поскольку твердая фаза загружается в состоянии плотной упаковки, то в начальных сечениях трубопровода ввиду интенсивного обмена импульсом между фазами происходит резкое падение концентрации твердых частиц, скорости газа ( $v_1$ ) и увеличения скорости твердых частиц ( $v_2$ ) до  $v_2 \sim 0,8 v_1$ , после чего на большей части длины трубопровода идет медленное возрастание скоростей обеих фаз, заканчивающееся перед выходом вновь их ускоренным ростом. Объемная концентрация частиц твердой фазы, резко падающая в начальных сечениях трубопровода до значения  $\sim 0,05$ , далее меняется слабо. То же самое происходит с пульсационной энергией твердых частиц так, что влияние вибрации на начальном участке быстро затухает.

Построенные для отдельных фаз потока эпюры скоростей [14] показали, что последние слабо меняются в поперечном направлении. Поэтому далее для описания процесса пневмотранспортирования была разработана одномерная математическая модель, в которую наряду с межфазной силой Стокса входят силы Никурадзе и Бусройда, учитывающие сопротивление, при движении по трубопроводу газа и частиц соответственно. В отличие от силы Никурадзе сила Бусройда к настоящему времени недостаточно обоснована теоретически в связи с чем необходим анализ движения частиц в трубопроводе. Существует три вида движения частиц в горизонтальном трубопроводе: по нижней стенке, с ударами о нижнюю стенку, с ударами о обе стенки.

При движении частицы в потоке газа по нижней стенке возможны различные режимы. На основе законов аэродинамики и механики твердого недеформируемого тела разработана [8] математическая модель качения эллипсоидальной частицы. На частицу такого вида во время ее движения кроме сил веса, аэродинамической, подъемной силы Магнуса-Жуковского действует сила инерции, вызванная криволинейностью траектории центра масс катящейся эллипсоидальной частицы. Найдено, что эта сила при определенной скорости во время разгона частицы вызывает ее отрыв от горизонтальной плоскости и подпрыгивание, а, при достижении угловой скоростью частицы некоторого значения, подъемная сила Магнуса-Жуковского обеспечивает частичное или полное ее взвешивание. Процессы взвешивания частиц в потоке рассматривались ранее [15], однако отсутствовали обоснованные выражения для критических скоростей взвешивания.

В результате расчетов, проведенных в ИГТМ НАНУ [8], получено, что для частицы с отношением осей эллиптического сечения  $1/2$ , и более существуют в зависимости от этого отношения и скорости газа четыре различных состояния: отсутствие движения, перекатывание без проскальзывания, перекатывание с проскальзыванием, скольжение без перекатывания. Показано, что движение эллипсоидальной частицы мало отличающейся от сферы можно описать движением эквивалентной сферической частицы. При этом имеют место режимы чистого качения и качение с проскальзыванием. Крупные частицы обычно начинают движение с перекатывания, которое затем переходит в качение со скольжением и при достижении скоростью некоторого значения могут вновь вернуться к режиму чистого качения. Мелкие частицы чаще начинают движение с режима качения при проскальзывании.

На плоскости параметров «скорость газа - скорость частиц» для частиц различного диаметра построены зоны вышеназванных режимов. Введено понятие показателя взвешенности как отношения силы Магнуса-Жуковского к силе веса. Оказалось, что для частицы разгоняющейся в потоке газа по истечении нескольких секунд движения и на протяжении нескольких метров пути показатель взвешенности очень быстро возрастает и становится близким к единице, т.е. практически частица вследствие ее раскрутки и возникающей при этом подъемной силе Магнуса-Жуковского взвешивается в потоке газа.

Взвешивание частиц твердой фазы пневмотранспортного потока является основным фактором обеспечивающим процесс транспортирования сыпучих материалов без закупорок трубопровода и с минимальной величиной сил сопротивления движению. В связи с этим возникает вопрос о величине скорости частиц и скорости газа при которых гарантируется состояние взвешивания частиц. Эта скорость обычно называется критической скоростью взвешивания.

При оценке состояния взвешивания в число поддерживающих сил входит и сила Сафмена, зависящая от поперечного градиента скорости газа. Показано, что эта сила оказывает влияние на взвешивание лишь пылевидных частиц ( $\sim 10^{-5}$  м) и при расчете пневмотранспортных потоков, содержащих среднедисперсную твердую фазу, ее можно не учитывать.

Условие взвешивания частиц определяется следующим образом. Состояние взвешивания будет обеспечено, если показатель взвешенности  $n$  не меньше некоторого заданного числа близкого к единице ( $n \gtrsim 1$ ). Показано, что при качении частицы с проскальзыванием полное взвешивание ( $n=1$ ) произойти не может и зона взвешивания на плоскости параметров «скорость газа - скорость частиц» существует только в области качения без проскальзывания. Выражая для этого случая угловую скорость через линейную в формуле Магнуса-Жуковского для подъемной силы, записываем условие взвешивания в виде квадратного неравенства относительно скорости частиц. Рассматривая последнее совместно с условиями непроскальзывания, находим выражения для критических скоростей газа и частиц соответствующих состоянию взвешивания [8].

Третий вид движения частиц в горизонтальном трубопроводе с ударами об обе стенки характерен своей периодичностью. Движение с ударами об обе стенки связано со значением подъемной силы, превышающим силу веса на этапе взлета и следовательно с достаточно большой угловой скоростью частицы. Рассмотрен наиболее простой случай, когда повторяемость кинематических параметров происходит при перелетах от стенки к стенке через два этапа на третий.

В рамках плоской задачи разработана математическая модель [9] периодического движения вращающейся частицы в потоке газа с ударами о нижнюю и верхнюю стенки горизонтального канала, исходными уравнениями которой являются два дифференциальных уравнения полета частицы, четыре соотношения связывающих скорости и ударные импульсы до и после удара о стенки, называемые условиями переключения, два выражения описывающие характер удара с проскальзыванием или без проскальзывания и три условия периодичности. Предполагается, что угловая скорость частицы меняется только во время ударов о стенки.

Дифференциальные уравнения полета частицы легко интегрируются, однако результирующие выражения содержат логарифм, что при рассмотрении их совместно с условиями переключения и периодичности приводит к системе трансцендентных уравнений. Исходя из необходимости решить данную задачу в замкнутом виде, нелинейное выражение для продольной скорости аппроксимируем линейным по времени соотношением и, подставляя в дифференциальные уравнения

полета частицы, интегрируем в пределах соответствующих первому и второму этапам движения.

При использовании безразмерных величин и после исключения некоторых переменных получена система семи нелинейных алгебраических уравнений, которую для случая движения с ударами при проскальзывании заменой переменных оказалось возможным привести к двум определяющим уравнениям. С помощью качественного анализа удалось найти в замкнутом виде решение этих уравнений. Получена приближенная формула для поперечной скорости частицы в зависимости от параметров канала, частицы и газа.

Аналогично выведены системы определяющих уравнений для случаев движения частиц с ударами без проскальзывания, а также для смешанного, когда о верхнюю стенку происходит удар частицы с проскальзыванием, а о нижнюю без проскальзывания. Для всех случаев движения произведено итерационным методом численное решение системы определяющих уравнений. Сравнение численного решения с аналитическим для случая движения с проскальзыванием показало их хорошее совпадение.

На плоскости параметров «коэффициент трения - коэффициент восстановления при ударе» построены области существования вышеперечисленных режимов с проскальзыванием, без проскальзывания и смешанного. Построены графики зависимости кинематических параметров частицы от скорости газа. Из графиков видно, что для режима движения частиц при ударах о стенки с проскальзыванием характерно возрастание продольной скорости, а также угловой скорости частицы и убывание поперечной ее скорости при возрастании скорости газа. Для режима движения частицы при ударах о стенки без проскальзывания характерно возрастание всех кинематических параметров кроме времени полета между стенками при увеличении скорости газа.

Движение с ударами только о нижнюю стенку неустойчиво и переходит в какой либо из вышеописанных основных типов.

Разработанные в ИГТМ НАН Украины математические модели основных режимов движения частицы в потоке газа по каналу позволили получить математическое описание сил сопротивления движению частиц. Определение сил сопротивления при расчете потоков «газ - твердые частицы» является одной из основных задач при проектировании пневмотранспортных систем, поскольку от величины сил сопротивления зависят все главные параметры системы такие как давление газа в начале трубопровода, расход газа и дальность транспортирования.

Вопросу о силах сопротивления посвящены работы [4, 15], а также обзорные монографии [1, 16]. В [1] на основе обобщения ряда экспериментальных работ для касательного напряжения трения на стенках предлагается выражение в виде аналогичном для чистого газа с эквивалентным коэффициентом трения, зависящим от числа Фруда. В [15]

потери на трение представлены как результат действия пульсаций в двухфазном потоке. В [4] силу сопротивления движению твердой фазы потока предлагается находить исходя из потерь импульса при ударе частиц о стенки канала. Однако все упомянутые авторы не дают достаточного математического оформления своим гипотезам и кроме того приводимые ими результаты существенно различаются причем даже качественно. Поэтому в настоящее время нельзя считать проблему о силах сопротивления полностью решенной в связи с чем и были проведены исследования по изучению этого вопроса.

Сила сопротивления частице катящейся в потоке газа по горизонтальной стенке определяется как осредненная по времени горизонтальная составляющая контактной силы. Причем она для чистого качения и для качения с проскальзыванием имеет различную величину, а зависимости для этих случаев от скорости газа отличаются качественно.

Силаовое взаимодействие для периодических режимов с ударами об обе стенки в отличие от настенного режима не является непрерывным, однако поскольку при величине объемной концентрации частиц  $\sim 0,05$  число частиц на один метр длины канала составляет  $\sim (10^2 \div 10^3)$ , то касательное импульсное взаимодействие частиц и стенок можно представить как непрерывное, осреднив его за период движения частицы и средняя сила сопротивления на единицу объема смеси равна сумме касательных ударных импульсов за период движения частицы, деленной на период и умноженной на число частиц в единице объема. Анализ сил сопротивления показал, что как для настенных так и для периодических режимов движения частиц в случае когда нет проскальзывания сила сопротивления возрастает при возрастании скорости газа тем быстрее, чем больше диаметр частиц. В случае движения с проскальзыванием сила сопротивления убывает при возрастании скорости газа и тем быстрее чем меньше диаметр частиц.

В итоге можно сделать заключение, что в потоке смеси «газ - твердые частицы» по горизонтальному трубопроводу, существует движение частиц как по нижней стенке так и с ударами об верхнюю и нижнюю стенки. Для обоих случаев имеют место режимы движения без проскальзывания и с проскальзыванием. Первый режим существует при не высоких скоростях в начале движения по трубопроводу и сила сопротивления возрастает с увеличением скорости. Второй режим осуществляется на всем оставшемся протяжении трубопровода и сила сопротивления падает по мере продвижения и нарастания скорости [10].

Анализ выражений для сил сопротивления приведенных в [1, 4] и сравнение их с аналогичными выражениями, полученными в ИГТМ, показывает, что по Бусройду сопротивление движению частиц на единицу объема смеси обратно пропорционально скорости газа, а по Михаэлидису оно не зависит от скорости газа и при неизменном расходе постоянно.

Если оценивать эти выражения, то для длинных пневмотрубопроводов предпочтение следует отдать формуле Бусройда [1], поскольку вид ее подтверждается вышеописанными зависимостями, полученными в ИГТМ.

Описание движения твердой фазы с помощью математических моделей движения одиночной частицы возможно только при малой объемной концентрации твердой фазы ( $< 0,05$ ), когда значительно чаще происходят столкновения частиц со стенками чем между собой и последними пренебрегают. При большей концентрации необходимо учитывать соударения частиц и это резко усложняет задачу. Во-первых алгоритм расчета приходится применять не к одной частице, а к многим, т.е. число уравнений возрастает пропорционально числу частиц. Во-вторых для учета столкновений необходимо определять их во времени и пространстве. В третьих необходим алгоритм расчета столкновений для определения послеударных скоростей частиц.

В ИГТМ НАНУ разработана в рамках плоской задачи математическая модель движения в потоке газа многих частиц на участке горизонтального канала с параллельными стенками. При этом использованы подходы Лагранжа и Эйлера. Движение рассматривается по Лагранжу так, что на основе методов динамики точки через некоторые интервалы времени определяются координаты, компоненты скорости и отслеживается траектория каждой отдельной частицы. В случае пересечения траекторий вычисляется момент столкновения двух вращающихся частиц и скорости их перед столкновением. При использовании методов динамики твердого тела и стереомеханической теории удара получены формулы для определения послеударных скоростей через доударные при столкновении частиц между собой и со стенками канала для случаев удара с проскальзыванием и без проскальзывания, а также условия проскальзывания и непроскальзывания.

Получены формулы для расчета скоростей для случая, когда частица ударяет по другой частице, катящейся по нижней стенке, а также для определения скорости отрыва катящейся частицы, форма которой мало отклоняется от сферы. По этим формулам определяются послеударные скорости и затем продолжается вычисление кинематических параметров каждой частицы в рамках подхода по Лагранжу. Одновременно с этим вычисляются средние по некоторому ограниченному объему величины такие как продольная и поперечная скорость, сила сопротивления. Эти величины являются характеристиками потока частиц по Эйлеру.

Движение частиц рассматривается слева направо на ограниченном участке канала и каждая частица, подходя к правому граничному сечению участка покидает его. Поскольку для стационарного потока концентрация частиц в пределах данного объема величина постоянная, то вместо ушедшей направо частицы слева должна появиться новая. Изучаемый поток считается макрооднородным во всей его длине и следовательно в

аналогичных конечных объемах, расположенных слева и справа, движение частиц происходит подобно рассматриваемому, то есть новая частица в левом сечении появляется на том же уровне и с той же скоростью, что и покидающая объем в правом сечении. В связи с этим границы рассматриваемого объема называются периодическими и выбираемая длина участка зависит от скорости газа [17].

Численная реализация вышеприведенного алгоритма позволила получить в зависимости от времени характеристики потока частиц. Поскольку начальные скорости частиц нулевые, то процесс моделирования описывает их разгон до некоторого установившегося состояния движения. При этом осредненная продольная компонента скорости частиц возрастая стремится к некоторому значению, характерному для данного потока. Поперечная средняя компонента скорости вначале разгона колеблется с переменной знака и в последующем затухает до небольших флуктуаций около нулевого значения. Это свидетельствует о том, что установившееся движение частиц происходит в среднем вдоль оси канала.

Силы сопротивления или касательные напряжения на стенках канала, вызванные воздействием частиц при их столкновениях со стенками, вначале разгона возрастают, что вызвано первоначальным оседанием частиц на нижнюю стенку, а затем убывают до некоторого установившегося значения характерного для данного потока. Таким образом прямое математическое моделирование движения многих частиц в потоке газа по горизонтальному трубопроводу подтверждает зависимости для сил сопротивления, полученные экспериментально [1] и на основе модели одиночной частицы [10].

В настоящее время в технике применяется широкая гамма пневмотранспортных устройств с большим диапазоном технологических параметров, что обуславливает необходимость получения полной картины поведения двухфазных пневмотранспортных потоков «газ - твердые частицы», которую могло бы дать общее решение определяющей системы дифференциальных уравнений одномерной математической модели. Однако, поскольку такое решение в аналитическом виде получить невозможно ввиду весьма сложной структуры их правых частей, то была применена качественная теория дифференциальных уравнений [2, 13] с использованием метода фазовой плоскости.

Построение фазовых траекторий на плоскости параметров «скорость частиц - скорость газа» и определение особых точек системы дифференциальных уравнений одномерной модели дало возможность получить интегральные кривые и характер движения изображающей точки для всей гаммы пневмотранспортных потоков. Поскольку у последних знаки скоростей фаз всегда одинаковы, то, считая их положительными, используется только первый квадрант фазовой плоскости. На этой плоскости выявлены область для пневмотранспортных систем низкого

давления, к которым относятся например малогабаритные эжекторные установки малой дальности (ВПМН), и область, соответствующая устройствам среднего и высокого давления, таким как тяжелые двухкамерные вибропневмотранспортные машины циклического действия, транспортирующие на значительные расстояния (ВПМЦ).

Все интегральные кривые на фазовой плоскости, выходя из особой точки типа «неустойчивый узел» прежде чем начать закручиваться вокруг особой точки «устойчивый фокус» пересекают биссектрису угла между осями координат первого квадранта. Левее и выше этой прямой скорость газа больше скорости частиц, правее и ниже наоборот. Поскольку источником движения двухфазной смеси служит давление газа, то он представляет собой активное начало в потоке смеси и режимы движения у которых скорость газа больше скорости частиц являются активными. В противоположном случае режим считается пассивным. Как следует из структуры интегральных кривых на фазовой плоскости изображающая точка,двигающаяся по кривой в положительном направлении, переходя из области, где скорость газа меньше скорости частиц в область, где скорость газа больше скорости, пересекает прямую, где эти скорости равны только один раз. Отсюда вытекает, что смена режимов движения происходит в последовательности только от пассивного к активному, а не наоборот.

Режим движения, начинающийся как пассивный, можно получить, если начальный разгон частиц осуществляется не газом, а некоторыми дополнительными средствами, например вибрототками направленного действия или метательными машинами.

Движение по интегральной кривой от начальной точки соответствует перемещению некоторого поперечного сечения стационарного двухфазного потока из его начального положения вдоль по потоку. Возможность дальнейшего движения обеих фаз, взятых в рассматриваемом сечении, считается исчерпанной, если давление газа в конечном сечении равно атмосферному. Длина, отсчитываемая от начального до конечного положения этого сечения, является дальностью транспортирования. На фазовой плоскости построена кривая, в каждой точке которой давление равно атмосферному. Уравнение этой кривой получается из уравнения состояния для газа при использовании уравнений расхода для газа и частиц. Конечной точкой интегральной кривой процесса пневмотранспортирования является точка ее пересечения с вышеназванной кривой атмосферного давления. Для различных интегральных кривых с начальной скоростью газа меньшей чем 0,55 от скорости звука как для активного так и пассивного начала движения, конечные точки весьма близки, т.е. отношение конечных скорости частиц и газа практически постоянно (0,6) и не зависит от начальных условий.

Принудительное увеличение начальной скорости частиц сыпучего материала, необходимое для избежания закупорки в начале трубопровода

так, что процесс вначале идет как пассивный, дает увеличение дальности транспортирования на небольшую величину ( $1,5 \div 2 \%$ ).

Поскольку аналитическое решение определяющих дифференциальных уравнений одномерной математической модели пневмотранспортной системы невозможно, а численное решение на ЭВМ не всегда удобно в инженерном деле, то для практических расчетов необходим сравнительно простой алгоритм, содержащий некоторые не очень сложные формулы, по которым можно определить все основные параметры проектируемой пневмотранспортной установки. Анализ численных решений определяющих дифференциальных уравнений показывает, что аппроксимация их результатов элементарными функциями с целью получения приближенных формул не представляется возможным и был предложен следующий подход. В исходных дифференциальных уравнениях произведена замена переменных от скоростей фаз сделан переход к давлению и полному импульсу.

Решение уравнений в новых переменных приводит к зависимостям, которые достаточно хорошо описываются элементарными функциями, в частности линейной. При использовании такой аппроксимации одно из определяющих уравнений - дифференциальное уравнение для полного импульса, удалось проинтегрировать и в результате получить формулу для дальности пневмотранспортирования. Последняя содержит приведенные импульсы сил сопротивления движению газа и частиц и ряд других параметров.

Поскольку сопротивление движению газа возрастает, а движению частиц убывает с повышением расхода воздуха, то дальность транспортирования, зависящая от обоих этих факторов, имеет максимум, т.е. регулируя расход воздуха можно добиваться оптимальных значений параметров системы. Условие максимума дальности транспортирования приводит к уравнению для рационального расхода воздуха. Из формулы дальности транспортирования видно, что увеличение давления воздуха в начале трубопровода увеличивает дальность, однако прирост дальности снижается с уменьшением расхода сыпучего материала.

Обычно при проектировании пневмотранспортной системы бывают заданы: расход сыпучего материала и его характеристики (плотность, крупность, коэффициент трения), дальность транспортирования. Требуется найти: рациональный расход воздуха, необходимое давление воздуха в начале трубопровода и его диаметр. Для определения первых двух имеется формула дальности и уравнение рационального расхода воздуха, образующие систему нелинейных уравнений. Диаметр трубопровода выражается через основные неизвестные при использовании условий взвешивания частиц. В качестве последних рассмотрено несколько гипотез взвешивания, которые предложены на основе анализа различных зависимостей скорости взвешивания от показателя взвешенности.

Разработана инженерная методика расчета параметров пневмотранспортных устройств [11], которая включает алгоритм решения методом Ньютона-Рафсона [3] системы трансцендентных уравнений, формулы для начальных приближений искомых величин и программу вычислений на микрокомпьютере МК-85. Результаты расчета, выполненного в соответствии с разработанной методикой, сравнивались с результатами эксперимента [12], проведенного на полигоне ИГТМ НАНУ в 1988 г. при использовании вибропневмотранспортных машин циклического действия (ВПМЦ). Оказалось, что результаты эксперимента хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов с использованием гипотезы взвешивания на основе минимальной критической скорости. Остальные гипотезы взвешивания приводят к малым величинам диаметра трубопровода, которые определяют завышение значения необходимого давления воздуха на входе.

В итоге можно отметить, что за последнее десятилетие в ИГТМ в результате проведенных исследований на основе современных теорий гетерогенных сред и механики смесей «газ - твердые частицы», а также серии экспериментальных и конструкторских работ созданы физически обоснованная и экспериментально подтвержденная теория пневмотранспортирования сыпучих материалов по горизонтальным трубопроводам и на ее основе ряд принципиально новых образцов пневмотранспортной техники. Разработанная инженерная методика позволяет проводить расчеты и проектирование пневмотранспортных машин и систем широкого класса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. - М.: Мир, 1975. - 378 с.
2. Бутенин Н.В. Элементы теории нелинейных колебаний. - Ленинград: Судпромгиз, 1962. - 196 с.
3. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке БЕЙСИК для персональных ЭВМ. - М.: Наука, 1987. - 240 с.
4. Михазлидис Е.Е. Движение частиц в газовом потоке. Средняя скорость и потери давления // Теоретические основы инженерных расчетов (Труды Американского общества инженеров механиков). - 1988. - № 1. - С. 276-288.
5. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. - М.: Наука, 1978. - 336 с.
6. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. - М.: Наука, 1984. - 288 с.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.

8. Пономарев Б.В. Взвешивание твердых частиц в горизонтальном пневмотранспортном потоке // Геотехническая механика (НАНУ ИГТМ, межведомств. сборн. научн. трудов). - 1998. - № 8.

9. Пономарев Б.В. Движение вращающихся частиц в потоке газа по горизонтальному трубопроводу с ударами об обе стенки // Геотехническая механика (НАНУ ИГТМ, межведомств. сборн. научн. трудов). - 1998. - № 7.

10. Пономарев Б.В. О силах сопротивления движению частиц в потоке газа по горизонтальному трубопроводу // Геотехническая механика (НАНУ ИГТМ, межведомств. сборн. научн. трудов). - 1998. - № 7.

11. Пономарев Б.В. Инженерный метод расчета пневмотранспортных систем // Геотехническая механика (НАНУ ИГТМ, межведомств. сборн. трудов). - 1998. - № 8.

12. Потураев В.Н., Волошин А.И., Пономарев Б.В. Вибрационно-пневматическое транспортирование сыпучих материалов. - Киев: Наук. Думка, 1989. - 246 с.

13. Потураев В.Н., Волошин А.И., Пономарев Б.В. Об одномерном потоке двухфазной смеси // Прикладная механика. - 1989. - 25, № 8. - С. 111-118.

14. Потураев В.Н., Волошин А.И., Пономарев Б.В., Кордюк О.Л. Математическое моделирование двухфазных потоков при пневмотранспорте сыпучих материалов // Докл. АН УССР. Сер.А. физ.-мат. и техн. науки. - 1988. - № 7 - С. 48-51.

15. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. - М.: Недра, 1980. - 292 с.

16. Соу С. Гидродинамика многофазных систем.- М.: Мир, 1971.- 536 с.

17. Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of gas - solid two - phase flow in a vertical pipe: on the effect of inter - particle collision // The American Society of Mechanical Engineers. - 1991. - Book № G00609. - FED - Vol. 121, Gas - Solid Flows.

**УДК 622.732:51.001.5**

В.Н. Потураев, В.П. Надутый, А.М. Эрперт

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДРОБИЛЬНО-СОРТИРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ИХ РАБОТЫ**

Розроблено лінійну регресійну модель дробарки та вібраційного грохота і на цій основі розроблено математичну модель двухстадіального циклу дроблення. Іл. 2. Бібліогр.: 4 найм.