Введение В химической и смежной отраслях промышленности высока потребность в непрерывном транспорте сырья, материалов и готовой продукции, представленной в виде твердого сыпучего материала. Одним из наиболее прогрессивных видов такого промышленного транспорта является перемещение сыпучего материала в потоке жидкости или газа [1]. Пневматический транспорт как способ перемещения твердых материалов потоком газа (чаще всего воздуха) применяется в различных отраслях промышленности уже более двухсот лет [4,5]. Однако, не смотря на столь солидную историю, этот способ перемещения материалов развивается и в настоящее время, предлагая новые технические решения, которые позволяют решать актуальные проблемы, стоящие перед промышленным транспортом. Широкое распространение пневмотранспорта в химической и других отраслях промышленности обусловлено его несомненными преимуществами [2,3,4 и др.]: - высокая пропускная способность при небольших габаритах установки, возможность прокладки трассы в недоступных другим видам транспорта местах (например, в узких проходах между зданиями или технологическими установками); - герметичность и отсутствие потерь материала при транспортировке; - возможность совмещения с другими технологическими процессами (чаще всего сушкой, например в аэротрубах); хотя эта возможность еще слабо изучена. Однако у процесса пневмотранспортирования есть и свои недостатки, основными из которых считается высокая энергоемкость перемещения единицы массы материала особенно на большие расстояния (примерно в два раза выше чем, например, у автомобильного транспорта). Современное состояние развития пневмотранспорта и основные проблемы его промышленного применения В настоящее время наибольшее распространение получили два вида пневматического транспорта: с низкой концентрацией или в разряженном потоке (объемная концентрация твердой фазы до 5%) и с высокой концентрацией или в плотном слое (объемная концентрация твердой фазы более 15%). Область с объемной концентрацией твердой фазы до 5% является наиболее характерным режимом для промышленного пневмотранспорта [2,3]. Это наиболее легко организуемая форма пневмо перемещения, когда частицы двигаются в потоке газа со скоростями 20-35 м/с. Именно этим и вызваны его наиболее характерные недостатки [3,4]: - малая концентрация твердой фазы приводит к необходимости перемещения больших объемов газовой массы на единицу перемещаемого материала, что приводит к относительно малому КПД транспорта и большим проблемам с отделением перемещаемого материала от несущего потока в конце пути; - высокие скорости твердой фазы (до 35 м/с), необходимые для обеспечения устойчивого транспорта и высокой пропускной способности системы, что приводит к быстрой эрозии труб (особенно в местах поворотов) и повреждению самого перемещаемого материала; - возможность возникновения и накопления статического разряда. В этой связи общемировой

тенденцией является переход к пневмотранспорту в плотном слое [3,4]. Пневмотранспорт в плотном слое, определяемый обычно как способ перемещения твердой фазы потоком газа при котором одно или более поперечных сечений трубы занято твердым материалом [3], решает многие вопросы, которые имеют место при пневмотранспорте в разряженном потоке. Его основные преимущества: - увеличение средней концентрации твердых частиц в потоке до 30-35% объемных позволяет в разы снизить объемы перемещаемого по системе газа и линейные скорости несущей и дисперсной фаз; это позволяет проводить отделение перемещенного материала от несущего газа в простейших устройствах; - уменьшение потока воздуха за счет увеличения концентрации (даже при необходимости значительно увеличивать градиент давления газа в трубе) позволяет по мнению многих авторов увеличить общее КПД установки [3,4,5]; - уменьшение скорости твердых частиц до 3-5 м/с влечет уменьшение эрозии стенок труб и самого транспортирования материала. Однако переход к более высоким концентрациям порождает дополнительные сложности. Основная из них - необходимость сохранения устойчивого режима движения плотного слоя в системе. Нарушение этого режима часто приводит к «завалу» [5], т.е. состоянию, когда в трубе образуется пробка из материала и дальнейшая работа системы пневмотранспорта становится невозможной. Именно это проблема, особенно при первых крупных внедрениях в начале 70-х годов, привела к некоторому недоверию к этому виду пневмотранспорта со стороны промышленности. Она в первую очередь была связана со слабой изученностью движения плотных слоев экспериментальном и особенно в теоретическом аспекте [3]. Широкие исследования последних 30 лет [3,4,5] позволили частично снять эту проблему. Основными видами пневмотранспорта в плотном слое являются [4,5]: - аэротрубы (аэрожелоба и аэролотки, подробнее - [6]) и их модификации (например, Fluidcon [8]); - пневмотранспорт в режиме псевдооживления (подробнее - [9]); - поршневой пневмотранспорт (подробнее - [3]). Судя по публикациям и их количеству, наиболее перспективным и часто используемым является поршневой пневмотранспорт. Пневмотранспорт заторможенном плотном слое Желание сохранить плотный слой по всей длине трубы и максимально увеличить концентрацию твердой фазы в потоке приблизив ее значение к концентрации в неподвижном слое приводит к появлению пневмотранспорта заторможенным плотным слоем (ЗПС). Данный режим движения плотного слоя возможен только при наличии в потоке дополнительных сжимающих напряжений. Их наличие обеспечивают либо установкой тормозящего устройства в конце трубы (диафрагма, конусный насадок и т.п.) [10,11], либо применением конических труб сужающихся к концу с углом конусности 1-2° [12]. На практике находит применение первый способ как более простой в реализации и имеющий больший энергетический КПД. Более того, для повышения энергетической эффективности из-за расширения газа

рекомендуется делать конические трубы, расширяющиеся к выходу твердой фазы [10]. Рис. 1 - Схема непрерывно действующего пневмоподъемника ЗПС

Рассмотрим типичное устройство установки пневмотранспорта ЗПС непрерывного действия, схема которого представлена на рис.1 [10]. Установка состоит из приемного бункера 1, дозирующего устройства 2, питающей емкости 3, транспортного трубопровода 4, регулирующего (тормозящего) устройства 5, верхнего бункера 6. Вариант дозирующего устройства показан на рисунке 2. Рис. 2 - Пример регулирующего устройства

Сыпучий материал из бункера 1 поступает через дозирующее устройство 2 в питающую емкость 3. Одним из назначений дозатора 2 в данном случае является разделение области высокого давления в питающей емкости 3 и области атмосферного давления в приемном бункере 1. В качестве дозирующего устройства могут использоваться секторный затвор, шнековый питатель или два параллельно включенных камерных питателя.

Сжатый газ от компрессора направляется в питающую емкость через патрубок 7, выдавливает материал в трубопровод и транспортирует его в верхний бункер. Здесь отработанный газ отделяется от сыпучего материала и через фильтр и патрубок 8 удаляется в атмосферу. Конструкция установки периодического действия упрощается: не требуется дозирующего устройства: вместо него устанавливается пробковый кран. В качестве регулирующего устройства используются конические тормозящие насадки (рис. 2) чаще всего с углом конусности 90° , диафрагмы и некоторые другие устройства. Экспериментальные исследования [10, 11, 12] и наши расчеты по математической модели, построенной по методике DES, показали, что наличие тормозящего устройства меняет структуру двухфазной системы в транспортном трубопроводе. Концентрация материала приближается к предельной, лишь на 5-10% ниже концентрации насыпного слоя транспортируемого материала. Преимуществами такого пневмотранспорта являются малый расход газа, низкие скорости транспортировки при сохранении высокой пропускной способности системы по твердой фазе, сохранение высокой концентрации по длине транспортного трубопровода, легкость регулирования скорости движения материала в широких пределах. Возможность значительного снижения скорости (до 0,03-0,05 м/с) позволяет устранить повреждения транспортируемого материала, уменьшает износ трубопровода и накапливание статического электричества. Недостатком пневмотранспорта ЗПС являются большие удельные (на единицу длины трубопровода) потери давления; однако значительность этого недостатка снижается за счет меньших расходов транспортирующего газа. Еще одним преимуществом пневмотранспорта ЗПС является простота его совмещения с другими технологическими процессами, такими как обжиг, адсорбция, сушка и рядом других. В настоящее время пневмотранспорт в режиме ЗПС иногда используют для крекинга нефтяного газа [7] и питания топливных форсунок, работающих на твердом топливе [13]. Фактически отсутствуют данные о

совмещении режима заторможенного плотного слоя с другими технологическими процессами химической промышленности. По опыту работы аппаратов с ЗПС, реализующих процессы крекинга (в которых обрабатываемый нефтяной газ транспортирует частицы катализатора) можно говорить о наличии следующих преимуществ при совмещении вышеперечисленных технологических операций с режимом перемещения в ЗПС: - малые скорости движения твердой фазы (до 0,03-0,05 м/с) обеспечивают большое время контакта фаз даже на малой длине; - равномерность распределения твердой фазы и ее хорошее поперечное перемешивание позволяют одинаково обрабатывать и использовать всю поверхность частиц; - достаточно равное время пребывания всех частиц в аппарате, в том числе и частиц разного размера (в отличие от аппаратов с псевдооживленным слоем) позволяет добиваться повышенного качества готового продукта. В аппаратах с ЗПС можно эффективно проводить практически все процессы, которые сегодня реализуются в оборудовании с псевдооживленными и кипящими слоями частиц, зачастую повышая эффективность этих процессов особенно за счет равномерного времени пребывания частиц. Низкие скорости движения газа и твердых частиц и малая эрозия трубопроводной системы позволяют предположить, что данный вид пневмотранспорта позволит эффективно проводить межоперационный транспорт наноматериалов, полученных в виде порошков. В пользу этого предположения говорят и малые расходы газа на транспорт твердой фазы, что позволит использовать для перемещения наночастиц не воздух, а газы в которых они не теряют своих свойств. Однако для полной реализации этих преимуществ необходимо иметь доскональное представление о структуре заторможенного плотного слоя и влиянию на него различных конструктивных, технологических и режимных параметров. Выводы Пневмотранспорт ЗПС является перспективным методом перемещения твердых материалов потоком газа, отвечающим современным тенденциям и требованиям, предъявляемым к современным установкам пневмотранспортирования. Можно предложить следующие рекомендации для его использования: 1. Пневмотранспорт ЗПС может применяться при перегрузке сыпучих материалов на небольшие расстояния (до 12-15 м для вертикального и до 50 м для горизонтального пневмотранспорта). Такая необходимость часто возникает в заводских условиях (межаппаратный, межэтажный транспорт). Использование трубопроводов большей длины сопряжено с трудностями из-за необходимости создания больших давлений в питателе установки. 2. Применение этого вида пневмотранспорта оправдано в том случае, когда сокращение расхода транспортирующего газа имеет решающее значение. Например, с помощью небольшого количества инертного газа можно без больших затрат произвести транспортировку химически нестабильных, взрывоопасных веществ, нанопорошков и т.п. Процесс обеспыливания отработанного воздуха также сильно упрощается. 3. Пневмотранспорт ЗПС

особенно эффективен при совмещении его с технологическим процессом, так как время контактирования газа с твердой фазой достаточно велико даже при небольших длинах транспортирования из-за возможности достижения низких скоростей движения материала. 4. Пневмотранспорт ЗПС может быть применен для дозирования сыпучих материалов. В этом случае одна питающая емкость может обслуживать несколько дозирующих устройств, причем расход материала в каждом из них можно легко регулировать путем подбора соответствующих насадков или диафрагм. Однако главной проблемой на пути внедрения пневмотранспорта ЗПС в промышленность является его малая изученность и отсутствие единой методики расчета и оптимального подбора его размерных, режимных и технологических параметров