

УДК 621.547

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

Роговой А.С.

ENERGY EFFICACY OF PNEUMATIC TRANSPORT PLANTS

Rogovyi A.

На основе показателей энергетической эффективности промышленного пневматического транспорта, таких как удельный расход электроэнергии на тонну перемещаемого материала и удельный расход электроэнергии на тонну и метр перемещения, была произведена систематизация и обобщение опыта создания пневмотранспортных установок. Для различных вариантов концентрации и производительности был проведен проектный расчет перемещения угольной пыли по горизонтальному трубопроводу различной длины для систем пневмотранспорта на основе разных насосов: транспортные аэрожелоба, струйные насосы, установки всасывающего действия, шлюзовые, пневмовинтовые и пневмокамерные насосы.

Ключевые слова: промышленный транспорт, энергетическая эффективность, удельный расход электроэнергии, пневматический транспорт, насос.

Постановка проблемы. Современное развитие ведущих отраслей промышленности – металлургической, горнодобывающей, энергетики, химической, сельского хозяйства и строительства, напрямую связано с широким внедрением в технологию производства комплексной механизации пневматического транспорта [1-10], который становится важнейшим элементом технологических комплексов. Практикой подтверждена эффективность применения этого вида транспорта (трубопроводный транспорт составляет 30% объема всех промышленных транспортных работ). Дальнейшее развитие техники и технологии пневматического транспорта является важной задачей, в связи с чем возникают сложные вопросы совершенствования этого вида транспорта, а также сочетания подачи материалов с основными производственными процессами. В различных технологических компонентах предприятий трубопроводный транспорт рассматривается теперь как важнейшее звено совершенствования производства [10].

Как известно [7, 8, 10], одним из основных недостатков пневмотранспорта является высокий удельный расход электроэнергии на тонну переме-

щаемого материала, что сдерживает широкое внедрение систем пневматического транспортирования грузов из-за недостаточной информации по энергоэффективности различных питателей и усложняет выбор и компоновку пневмотранспортной установки [1-9, 13, 14].

Анализ последних исследований и публикаций. Выбору пневмотранспортного оборудования и машин для перемещения различных сыпучих грузов во многих отраслях промышленности посвящено значительное число справочников [1-8, 10, 11, 13, 14], однако приведенные в них технические характеристики машин не всегда позволяют оценить их энергоэффективность. Зачастую в справочниках приводят преимущества и недостатки тех или иных машин, используемых в качестве питателей в пневмотранспортных установках, а также стандартную типологию применяемых машин, основанную на показателях производительности и техпроцесса, естественно, принимая во внимание капиталовложения и габариты [1, 4, 6-8], при этом энергозатраты учитывались как второстепенный фактор. В последнее время, энергоэффективность и стоимость обслуживания, «при прочих равных», приобретают приоритетное значение при выборе решения в случае нового строительства или модернизации участков пневмотранспорта. Но, энергоэффективность тех или иных установок, в большинстве справочников, не приведены, поэтому приходится производить проектный расчет установки, с применением различных питателей и принимать решение относительно выбора наилучшего.

В настоящей статье авторами систематизирован и обобщен опыт создания пневмотранспортного оборудования, созданного отечественными и зарубежными производителями [1-19], для перемещения угольной пыли, результатом чего стал возможным отбор проектных решений относительно выбора питателей на основе учета и минимизации основного

недостатка пневмотранспорта – удельного расхода электроэнергии на тонну перемещаемого материала.

Цель. Целью работы является систематизация и обобщение опыта создания пневмотранспортных установок и сравнение их энергетической эффективности.

Результаты исследований.

Для оценки энергетической эффективности пневмотранспортных установок, производился проектный расчет для перемещения угольной пыли по горизонтальному трубопроводу различной длины. Расчеты произведены по методикам, приведенным в справочниках и монографиях [1-19], что позволило рассчитать два основных показателя транспортирования груза – удельный расход электроэнергии на тонну перемещаемого материала (e_m) и удельный расход электроэнергии на тонну и метр перемещения (e_L).

Перемещение сыпучих материалов в трубопроводе осуществляется разными способами: 1) путем переноса твердых частиц материала обтекающим их воздухом или газом (или путем выдавливания воздухом скоплений материала) [1-8, 10, 11, 13-14]; 2) путем придания материалу текучести за счет аэрации (насыщение воздухом) [2, 4, 7, 8]. В зависимости от способа создания воздушного потока и условий движения его в трубопроводе вместе с материалом различаются следующие основные системы пневмотранспортных установок: всасывающие, нагнетательные и комбинированные (всасывающе-нагнетательные). По величине создаваемой разности давлений установки можно разделить на: 1) установки низкого давления (до 100 кПа): струйные аппараты [1, 4-7, 9-15], установки всасывающего действия [1-8, 10, 11, 13, 14], шлюзовые питатели [1, 4, 5, 7, 13, 14] и аэрожелоба [4, 7, 8]; 2) установки среднего давления (100-300 кПа): пневмовинтовые насосы [4, 7, 8, 13, 14] и 3) установки высоконапорного импульсного транспортирования – камерные питатели (давление выше 300 кПа) [4, 6-10, 13, 14].

Аэрожелоба. Транспортные аэрожелоба – один из видов горизонтального пневмотранспорта сухих мелких некомующихся материалов. Они относятся к установкам нагнетательного действия с низким давлением, транспортирующим материал в условиях плотной фазы [4, 7, 8]. Используются чаще всего для вспомогательных операций и предназначены для транспортирования с небольшим уклоном при подаче из одного пункта в другой, а также для сбора материала из ряда точек и подачи в одну точку.

Характеристики энергетической эффективности перемещения с помощью аэрожелобов представлены на рис. 1. Данные взяты из [4, 8], при этом техническая производительность Π_T варьировалась в диапазоне 25-165 т/ч, дальность транспортирования L_{np} – от 10 до 40 м.

Удельные затраты электроэнергии на перемещение вычислялись следующим образом: затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала

$e_m = N / \Pi_T$, кВтч/т, где N – затраченная мощность; затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала на 1 м: $e_L = e_m / L_{np}$.

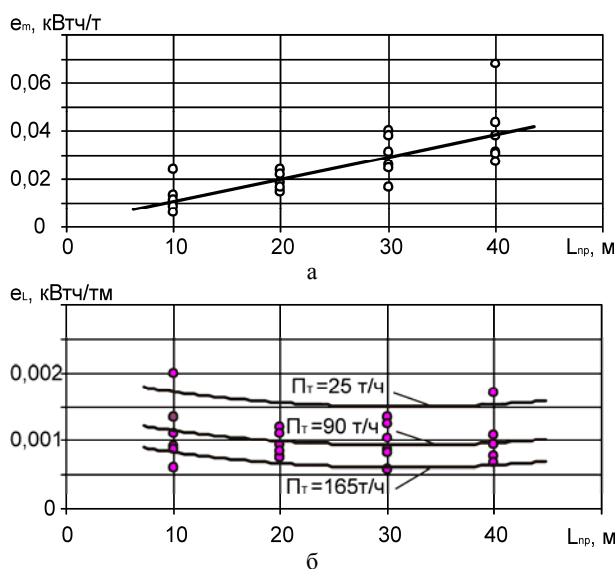


Рис. 1. Энергетическая эффективность перемещения грузов с помощью пневматических транспортных аэрожелобов: а – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала; б – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала на 1 м

Как видно из рис. 1, а затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала прямо пропорциональны дальности транспортирования и колеблются в диапазоне 0,01-0,07 кВтч/т. Вследствие чего наиболее часто пневмотранспортные аэрожелоба применяются при горизонтальном перемещении материала на длину до 40 м. Исходя из рис. 1, б, где видно наличие минимума удельных энергозатрат, наиболее рациональным является использование аэрожелобов при перемещении на 25-35 м с максимальной возможной производительностью, так как чем меньше производительность, тем выше энергозатраты. Точки на графиках соответствуют применяемым в промышленности желобам.

Струйные насосы. Струйные насосы применяются в основном на зерноперерабатывающих предприятиях для транспортирования зерна, муки, крупы и других продуктов, в отечественной промышленности – для транспортирования цемента на расстояние до 150 м, за рубежом, в частности на теплостанциях Германии, применяют для пневмотранспортирования золы и угольной пыли. Перемещение груза на длину более 150 м возможно, но является более энергозатратным, по сравнению с другими питателями. Положительными качествами струйных насосов для пневмотранспорта является: компактность, низкие расходы на техническое обслуживание, надежность и долговечность, вследствие отсутствия подвижных элементов и простоты конструкции, непрерывный режим работы. Однако, обладают следующими недостатками: расстояние транспортировки до 150 м, высокое потребление сжатого воздуха,

и высокое удельное энергопотребление. Несмотря на приведенные недостатки, работы по совершенствованию струйных насосов для пневмотранспорта постоянно ведутся, что приводит к постепенному снижению недостатков и все более широкому применению в промышленном транспорте предприятий. Нормальная эксплуатация насоса обеспечивается при условии, что аэродинамическое сопротивление в магистральном трубопроводе не должно превышать сопротивления слоя материала в бункере, в противном случае происходит прорыв сжатого воздуха из насоса в бункер, что ухудшает условия поступления материала в насос и увеличивает расход сжатого воздуха [1, 4-7, 9-18].

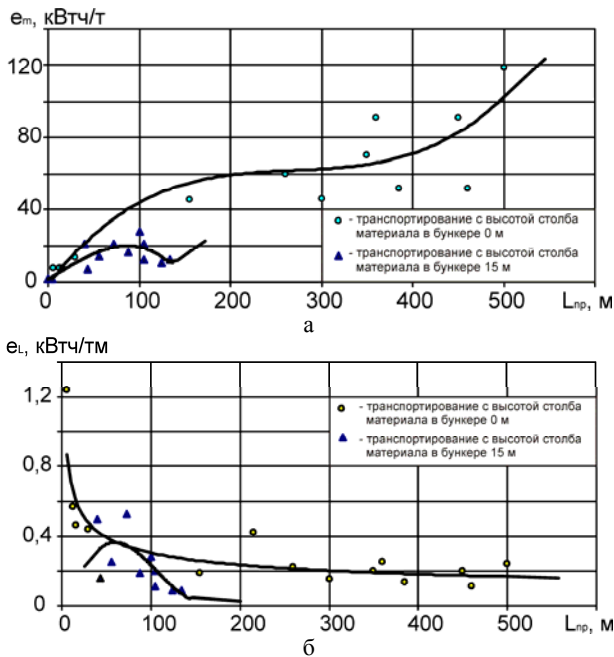


Рис. 2. Энергетическая эффективность перемещения грузов с помощью струйных насосов для пневмотранспорта: а – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала; б – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала на 1 м

Расчет струйных аппаратов производился по методике, описанной в [11], расчет аэродинамического сопротивления сети производился по методике [8]. Основные параметры расчета: коэффициент эжекции или концентрации смеси – $\mu = 2 - 70$ кг/кг; производительность $\Pi_T = 1 - 130$ т/ч; материал – угольная пыль.

Как видно из рис. 2, а затраты энергии на перемещение 1 т материала растут в зависимости от дальности транспортирования и являются значительными. Наиболее рациональным становится применение струйных насосов при перемещении груза до 150 м с использованием бункера с высотой столба аэрированного материала более 15 м. Из рис. 2, б, следует, что удельные энергозатраты снижаются при увеличении дальности транспортирования, с асимптотой порядка 0,2 кВтч/тм; при транспортировании с использованием столба аэрированного

материала 15 м, вследствие увеличения аэродинамического сопротивления движению материала, уменьшается возможная длина транспортирования до 200 м.

Установки всасывающего действия. Пневморазгрузчики всасывающего действия, выпускающиеся длительное время серийно и находящиеся в эксплуатации, предназначены для разгрузки сыпучего материала из крытых железнодорожных вагонов. Их широко применяют благодаря их высоким эксплуатационным качествам, обеспечению необходимых санитарно-гигиенических условий труда обслуживающего персонала, исключению потерь материала [1-8, 10, 11, 13, 14]. В установках всасывающего действия используется низкий (до 90 кПа), средний (до 70 кПа) и высокий (до 40 кПа) вакуум.

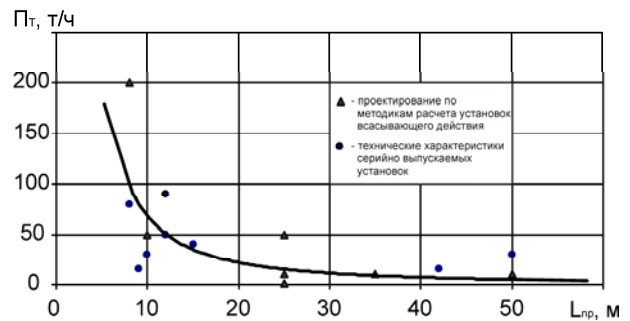


Рис. 3. Зависимость производительности установок всасывающего действия от приведенной дальности транспортирования

Как видно из рис.3 одним из основных недостатков пневмотранспортных установок всасывающего действия является снижение производительности с увеличением дальности транспортирования, вследствие увеличения аэродинамического сопротивления потока высокой концентрации и невозможности увеличения создаваемой разности давлений установки.

Расчет установок всасывающего действия производился по методике, описанной в [8], расчет аэродинамического сопротивления сети производился по методике [8]. Основные параметры расчета: концентрация смеси – $\mu = 1 - 200$ кг/кг; материал – угольная пыль.

Как видно из рис. 4, а затраты энергии на перемещение 1 т материала растут в зависимости от дальности транспортирования и имеют минимум при дальности транспортирования 20-30 м. Установки всасывающего действия могут использоваться при дальности перемещения груза до 50 м. Из рис. 4, б, следует, что удельные энергозатраты снижаются при увеличении дальности транспортирования и имеют минимум при длине транспортирования 14-16 м. Таким образом, при использовании установок всасывающего действия, наиболее энергетически эффективной будет дальность транспортирования 15-25 м.

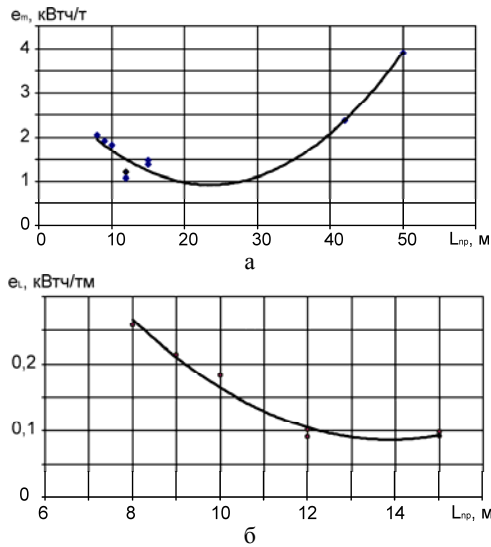


Рис. 4. Энергетическая эффективность перемещения грузов с помощью установок всасывающего действия: а – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала; б – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала на 1 м

Одним из недостатков установок всасывающего действия является, во многих случаях, необходимость стыковки с другими видами транспорта (нагнетательными).

Шлюзовые насосы. Шлюзовые насосы или питатели применяют для перемещения пылевидных и мелкозернистых малоабразивных и нелипких материалов, таких как мука, зерно, измельченная древесина и др., на установках всасывающего и нагнетательного действия при рабочем давлении до 0,25 МПа и дальности подачи до 100 м. Из-за сложности уплотнения между вращающимся ротором и неподвижными деталями (корпус и торцевые крышки) неизбежны произвольные утечки сжатого воздуха, которые колеблются от 0,5 до 2 м³/мин в зависимости от избыточного давления в аэрокамере. Это значительно увеличивает энергоемкость питателя и почти полностью исключает его работу с абразивным материалом, таким как цемент, при высоких давлениях в аэрокамере [1, 4, 5, 7, 13, 14].

Технические характеристики шлюзовых питателей выбирались из справочников [1, 7]. Расчет параметров шлюзового питателя таких как: производительность, угловая скорость, утечки через щели – по методике, описанной в [13]. Расчет аэродинамического сопротивления сети производился по методике [8]. Основные параметры расчета: концентрация смеси в питателе – $\mu = 160-170$ кг/кг; производительность $\Pi_{\tau} = 2-27$ т/ч; материал – угольная пыль. Дальность транспортирования была ограничена 200 м, вследствие значительного увеличения утечек через торцевые крышки, из-за увеличения давления в камере смешения.

Как видно из рис. 5, а затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала прямо пропорциональны дальности транспортирования и колеблются в диапазоне 1-5 кВтч/т. Вследствие чего наиболее

часто шлюзовые насосы применяются при горизонтальном перемещении материала на длину до 200 м. На рис. 5, б, видно, что удельные энергозатраты уменьшаются линейно в зависимости от длины транспортирования и достигают минимума при 200 м.

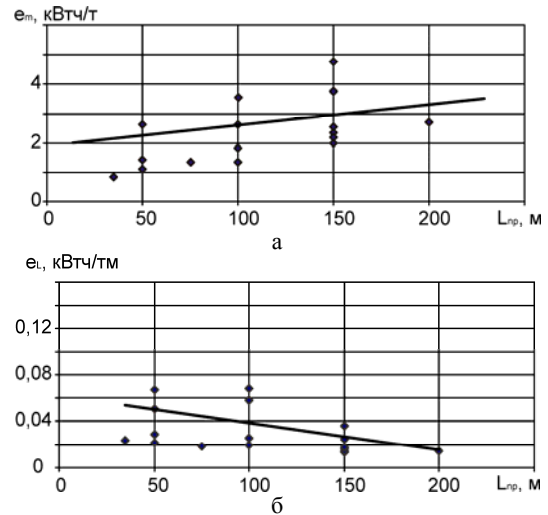


Рис. 5. Энергетическая эффективность перемещения грузов с помощью шлюзовых насосов: а – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала; б – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала на 1 м

Пневмовинтовые насосы. Пневматические винтовые насосы являются не только весьма распространенным средством транспорта, но и входят составной частью в комплекты технологического оборудования на цементных заводах и заводах бетонных и железобетонных изделий. Кроме того, пневмовинтовые насосы широко применяются на гипсовых заводах и заводах силикатных материалов, на предприятиях химической, металлургической промышленности и пр. Эти насосы предназначены для транспортирования сыпучих материалов тонкого помола на расстояния до 200 м по трубопроводам произвольной конфигурации, включая вертикальные, горизонтальные и наклонные участки. Цифра 200 м обуславливается в основном тем, что с увеличением дальности подачи увеличивается рабочее давление в смесительной камере, и как следствие, прогрессивно растет износ напорного быстроходного шнека [4, 7, 8, 13, 14]. Преимущества пневмовинтовых насосов заключаются в: низкой высоте конструкции; необязательности наличия столба аэрированного материала; необязательности встройки в линию воздухопроводников; возможности работы на среднем и низком давлении; непрерывная транспортировка без пульсаций; возможность частичной производительности. Недостатки: потребление электроэнергии на привод шнека; абразивный износ шнека и гильзы; высокое потребление сжатого воздуха. Все перечисленные недостатки заставляют учитывать их при проектировании установки пневмотранспорта добавляя к капитальным затратам вы-

сококу стоимость технического обслуживания и затраты на электроэнергию.

Технические характеристики пневмовинтовых насосов выбирались из справочников [7, 8]. Расчет параметров насоса таких как: диаметр шнека, рабочее давление, частота вращения – по методике, описанной в [7]. Расчет аэродинамического сопротивления сети производился по методике [8]. Основные параметры расчета: концентрация смеси в питателе – $\mu = 5 - 80$ кг/кг; материал – угольная пыль.

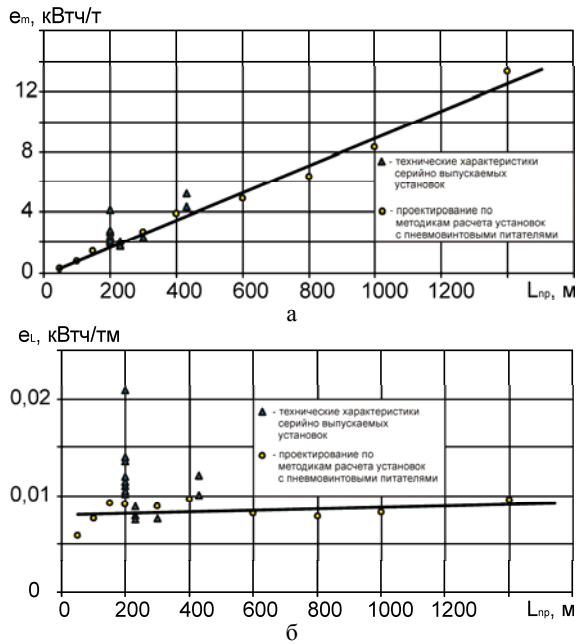


Рис. 6. Энергетическая эффективность перемещения грузов с помощью пневмовинтовых насосов: а – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала; б – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала на 1 м

Как видно из рис. 6, а затраты энергии на перемещение 1 т материала прямо пропорциональны дальности транспортирования. Вследствие чего серийные установки наиболее часто выпускаются при транспортировании до 500 м. На рис. 6, б, видно, что удельные энергозатраты практически не зависят от длины перемещения груза, и колеблются в диапазоне 0,006-0,01 кВтч/тм.

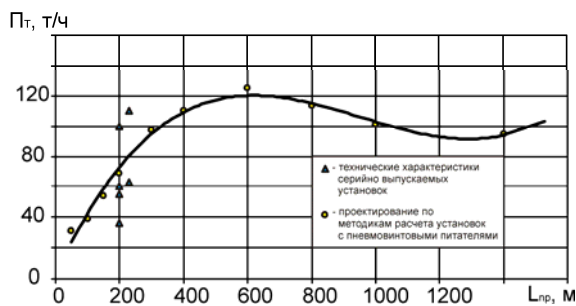


Рис. 7. Зависимость производительности установок на основе пневмовинтовых насосов от приведенной дальности транспортирования

Согласно методики расчета установок пневмотранспорта ВНИИстройдормаша [4, 7, 8] производительность системы зависит от пропускной способности сечения трубопровода, оптимальные значения которой приведены в [8]. Вследствие этого, при транспортировании сыпучих материалов на большие расстояния возникают ограничения по производительности, что иллюстрируется рис. 7.

Пневматические камерные насосы. Камерный насос представляет собой один или несколько сосудов, оборудованных загрузочным патрубком, с плотно закрывающимся клапаном, герметизирующим сосуд после загрузки, и разгрузочным устройством, обеспечивающим интенсивное разрыхление и выдачу аэрированного материала в транспортный трубопровод. Они широко используются в промышленности стройматериалов, химической, энергетической, черной и цветной металлургии и многих других отраслях для транспортирования цемента, глинозема, угольной пыли, золы, формовочных смесей, колосниковой пыли доменных печей, апатитового концентрата, фосфоритной муки и т.п. [4, 6-10, 13, 14].

Камерные насосы работают периодически, поэтому для увеличения производительности и создания условий, близких к непрерывному процессу транспортирования, применяют сдвоенные (двухкамерные) установки пневматических камерных насосов. В то время как резервуар одного камерного насоса разгружается и материал направляется в транспортный трубопровод, другой камерный насос загружается материалом. Преимущества насосов: низкие расходы на техобслуживание; возможность частичной производительности; невысокие показатели энергопотребления. Недостатки: большая высота, чем у других насосов, что иногда не позволяет их вписать в необходимые габаритные размеры; прерывистый (пульсирующий) поток; при использовании камерных насосов необходимо соблюдать требования промышленной безопасности как к сосудам, работающим под давлением; наличие столба материала для быстрого заполнения камеры; наличие воздушосборников во избежание просадки давления; большой расход сжатого воздуха.

Согласно [6] вследствие дискретности выхода в трубу транспортируемого материала, размеры (или массы) разгоняющихся порций материала вызывают соответствующие колебания различных параметров процесса, например давления газа и плотность аэро-смеси, что, в свою очередь, приводит к тому, что камерный питатель вместе с прилегающим к нему участком трассы может представлять сложную колебательную систему, частотные и амплитудные характеристики которой будут меняться в зависимости от конструкции питателя, геометрии прилегающей трассы, параметров подаваемого газа и свойств материала. Все это, в конечном счете, будет определять осредненные характеристики течения пневмотранспортного процесса, такие как сопротивление питателя и его производительность, и может искажать результаты расчетов пневмотранспортных систем на основе камерных питателей.

Технические характеристики камерных питателей выбирались из справочников [7, 8]. Расчет аэродинамического сопротивления сети производился по методике [8]. Основные параметры расчета: концентрация смеси в питателе – $\mu = 14-120$ кг/кг; расчетная производительность – $\Pi_T = 10-100$ т/ч; материал – угольная пыль.

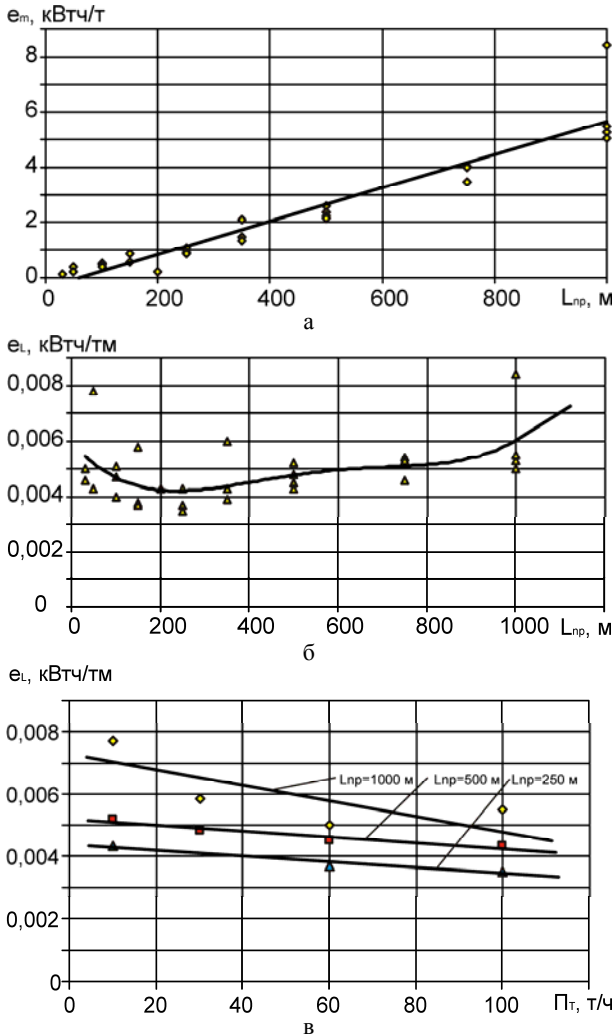


Рис. 8. Энергетическая эффективность перемещения грузов с помощью пневматических камерных насосов: а – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала; б – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала на 1 м; в – зависимость удельных энергозатрат от производительности насоса

Как видно из рис. 8, а затраты энергии на перемещение 1 т материала прямо пропорциональны дальности транспортирования. На рис. 8, б, видно, что удельные энергозатраты незначительно зависят от длины перемещения груза, и колеблются в диапазоне 0,003-0,008 кВтч/тм. Согласно рис. 8, в, удельные энергозатраты зависят от двух основных параметров: производительности и дальности транспортирования, причем чем больше производительность установки и чем меньше дальность, тем меньше и затраты. Минимальные энергозатраты возникают при дальности транспортирования 150-350 м и производительностью более 100 т/ч.

В данной работе рассматривались только системы для горизонтального транспортирования сыпучих материалов, поэтому в рамках данного исследования остались без внимания пневматические подъемники, вследствие практически полной невозможности транспортирования по горизонтали [4, 7, 8]. Также в данной работе не рассмотрены пневмопушки (миникамерные или пневмоимпульсные насосы), вследствие того, что это направление является сравнительно новым, и, пока обладает недостатком, заключающемся в необходимости проектирования каждой системы индивидуально, и возможности «схлопывания» (закупоривания) пневмотранспорта при нарушении совокупности исходных параметров. Указанные недостатки не позволяют спрогнозировать существенный порядок эффективности пневмопушки. Контейнерный пневмотранспорт не рассматривался из-за его редкого применения на предприятиях, и больших энергозатрат на перемещение контейнера [7].

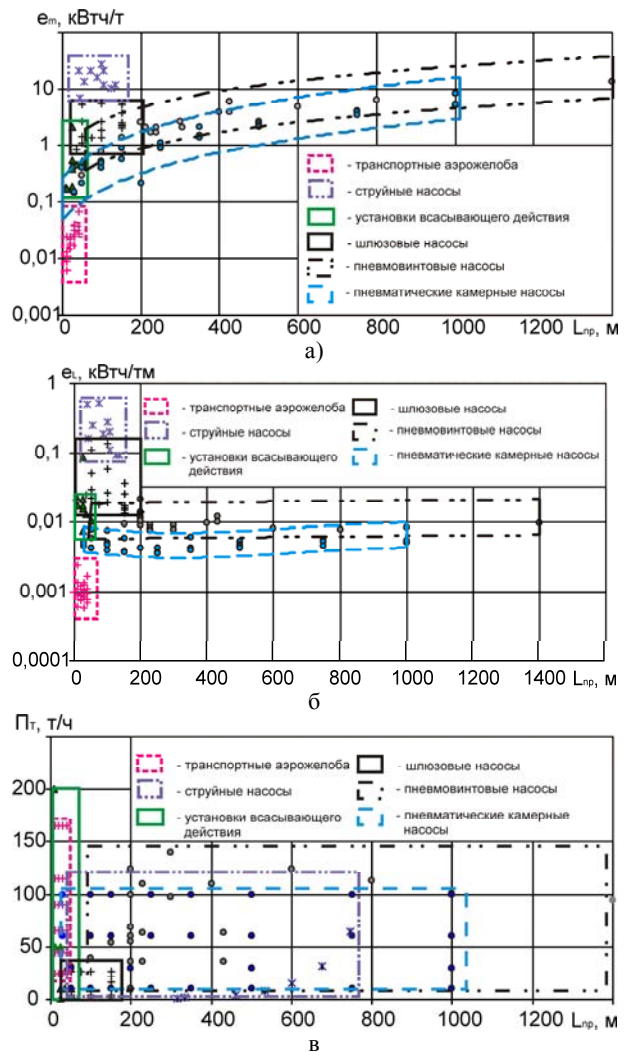


Рис. 9. Совмещенные характеристики энергетической эффективности перемещения грузов с помощью рассмотренных пневмотранспортных установок: а – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала; б – затраты электроэнергии на перемещение 1 т материала на 1 м; в – диапазон длин перемещения груза и производительности рассмотренных установок

На рис. 9. приведены совмещенные характеристики рассмотренных пневмотранспортных установок.

Как видно из рис. 9, а и 9, б наихудшими показателями энергоэффективности обладают струйные насосы, однако их широкое применение в промышленном транспорте говорит о том, что их основные преимущества такие как надежность и долговечность, во многих случаях являются решающими при принятии проектных решений о использовании того или иного вида питателя, так как эти показатели приводят, в конечном итоге, к уменьшению затрат на техническое обслуживание установок. Таким образом, дальнейшее совершенствование струйных нагнетателей, поиск новых технических решений, основанных на более эффективных принципах передачи энергии, позволит снизить удельные энергозатраты и улучшить экономические характеристики промышленного пневмотранспорта.

Выводы:

1) На основе показателей энергетической эффективности промышленного пневматического транспорта, таких как удельный расход электроэнергии на тонну перемещаемого материала и удельный расход электроэнергии на тонну и метр перемещения, была произведена систематизация и обобщение опыта создания пневмотранспортных установок. Для различных вариантов концентрации и производительности был проведен проектный расчет перемещения угольной пыли по горизонтальному трубопроводу различной длины для систем пневмотранспорта на основе разных насосов: транспортные аэрожелоба, струйные насосы, установки всасывающего действия, шлюзовые, пневмовинтовые и пневмокамерные насосы.

2) Согласно показателей энергетической эффективности было выявлено, что наихудшими обладают струйные насосы, однако их широкое применение в промышленном транспорте говорит о том, что их основные преимущества такие как надежность и долговечность, во многих случаях являются решающими при принятии проектных решений о использовании того или иного вида питателя, так как эти показатели приводят, в конечном итоге, к уменьшению затрат на техническое обслуживание установок.

3) Практически все питатели, используемые в пневмотранспортных установках, кроме струйных, подвержены значительному износу при перемещении сыпучего груза на расстоянии более 200 м, вследствие роста давления в смесительной камере.

4) Таким образом, дальнейшее совершенствование струйных нагнетателей, поиск новых технических решений, основанных на более эффективных принципах передачи энергии, позволит снизить удельные энергозатраты и улучшить экономические характеристики промышленного пневмотранспорта.

Литература

1. Александров А.Н. Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях: Справочник./ Александров А.Н., Косориз Г.Ф. – М.: Лесн. пром-ть, 1988. – 248 с.
2. Вайсман М.Р. Вентиляционные и пневмотранспортные установки. / Вайсман М.Р., Грубиян И.Я. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1984. – 367 с.
3. Володин Н.П. Справочник по аспирационным и пневмотранспортным установкам. / Н.П. Володин, М.Г. Касторных, А.И. Кривошеин. – М.:Колос, 1984. – 288с.
4. Калинушкин М.П. Пневматический транспорт в строительстве. / Калинушкин М.П., Орловский З.Э., Сегаль И.С. – М.: Госстройиздат, 1961. – 164 с.
5. Клячко Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов. / Клячко Л.С., Одельский Э.Х., Хрусталева Б.М. – Мн.: Наука и техника, 1983. – 216 с.
6. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. / Орловский Г.М. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
7. Пневмотранспортное оборудование: Справочник / М.П. Калинушкин, М.А. Коппель, В.С. Серяков, М.М. Шапунов; Под общ. ред. М.П. Калинушкина. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 286 с.
8. Пневмотранспортные установки. Справочник. [Воробьев А.А., Матвеев А.И., Носко Г.С. и др.] – Л.: Машиностроение, 1969. – 200 с.
9. Роговий А.С. Удосконалення енергетичних характеристик струминних нагінатив. Дис...канд. техн. наук: 05.05.17 / Східноукраїнський національний ун-т ім. Володимира Даля. — Луганськ, 2007. — 193 с.
10. Смолдырев А.Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле. / Смолдырев А.Е. – М.: Металлургия, 1967. – 368 с.
11. Соколов Е.Я. Струйные аппараты. / Соколов Е.Я., Зингер Н.М. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
12. Сполучення вихрових виконавчих пристроїв із сучасними системами управління / Сьомін Д.О., Павлюченко В.О., Ремень В.І., Мальцев Я.І. – Луганськ : вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля, 2002. – 174 с.
13. Klinzing G.E., Marcus R.D., Rizk F., Leung L.S. Pneumatic conveying of solids. A theoretical and practical approach (Powder technology series), 2nd Edition, Chapman&HallSuffolk, (1997), 624 p.
14. Mills D., (2004), Pneumatic Conveying Design Guide, 2nd Edition, Bitterworth-Heinemann, ISBN:0750654716., (2004), 638 p.
15. Syomin D., Rogovoy A. Features of a working process and characteristics of irrotational centrifugal pumps. // Procedia Engineering, Volume 39, 2012, Pages 231–237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.029>.
16. Syomin D., Pavljuchenko V., Maltsev Y., Rogovoy A., Dmitrienko D. Vortex mechanical devices in control systems of fluid mediums. // Polish academy of sciences branch in Lublin. TEKA. Commission of motorization and power industry in agriculture. Volume X. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, № 10. – P. 440-445.
17. Syomin D., Rogovoy A. Power characteristics of superchargers with vortex work chamber // Polish academy of sciences branch in Lublin. TEKA. Commission of motorization and power industry in agriculture. Volume XB. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, № 19. – 2010 - P. 232-240.
18. Syomin D., Rogovoy A. Mathematical simulation of gas bubble moving in central region of the short vortex chamber // Polish academy of sciences branch in Lublin. TEKA. Commission of motorization and energetics in ag-

riculture. An international journal on motorization, vehicle operation, energy efficiency and mechanical engineering Volume 12. No 4. Lublin-Lugansk. XB. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, V.12 No4. – 2012 - P. 279-284.

19. Molerus O. Overview: pneumatic transport of solids // Powder technology. – 1996. – Т. 88. – №. 3. – С. 309-321.

References

- Aleksandrov A.N. Pnevмотранспорт і пилеулавлювачів: сооруження на деревообробних підприємствах. Справочник / Aleksandrov A.N., Kosoriz G.F. – М.: Lesn. prom-t', 1988. – 248 s.
- Vajsman M.R. Ventilacionnye i pnevмотранспортные установкi. / Vajsman M.R., Grubijan I.Ja. – 3-e izd., pererab. i dop. – М.:Kolos, 1984. – 367 s.
- Volodin N.P. Spravochnik po aspiracionnym i pnevмотранспортным ustanovkam. / N.P. Volodin, M.G. Kastornyh, A.I. Krivoshein. – М.:Kolos, 1984. – 288s.
- Kalinushkin M.P. Pnevматический транспорт в строitel'stve. / Kalinushkin M.P., Orlovskij Z.Je., Segal' I.S. – М.: Gosstrojizdat, 1961. – 164 s.
- Kljachko L.S. Pnevматический транспорт сыпучих materialov. / Kljachko L.S., Odel'skij Je.H., Hrustalev B.M. – Мн.: Nauka i tehnika, 1983. – 216 s.
- Ostrovskij G.M. Pnevматический транспорт сыпучих materialov v himической promyshlennosti. / Orlovskij G.M. – L.: Himija, 1984. – 104 s.
- Pnevмотранспортное оборудование: Spravochnik / M.P. Kalinushkin, M.A. Koppel', V.S. Serjakov, M.M. Shapunov; Pod obshh. red. M.P. Kalinushkina. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1986. – 286 s.
- Pnevмотранспортные установкi. Spravochnik. [Vo-rob'ev A.A., Matveev A.I., Nosko G.S. i dr.] – L.: Mashinostroenie, 1969. – 200 s.
- Rogovij A.S. Udoskonaljuvannja energetichnih charakteristik struminnih naginatchiv. Dis...kand. tehn. na-uk: 05.05.17 / Shidnoukrains'kij nacional'nij un-t im. Volodimira Dalja. — Lugans'k, 2007. — 193 s.
- Smoldyrev A.E. Gidravlicheskij i pnevматический транспорт v metallurgii i gornom dele. / Smoldyrev A.E. – М.: Metallurgija, 1967. – 368 s.
- Sokolov E.Ja. Strujnye apparaty. / Sokolov E.Ja., Zinger N.M. – 3-e izd., pererab. – М.: Jenergoatomizdat, 1989. – 352 s.
- Spoluchennja vihrovih vikonavchih pristrojiv iz suchasnymi sistemami upravlinnja / S'omin D.O., Pavljuchenko V.O., Remen' V.I., Mal'cev Ja.I. – Lugans'k : vid-vo Shidnoukr. nac. un-tu im. V.Dalja, 2002. – 174 s.
- Klinzing G.E., Marcus R.D., Rizk F., Leung L.S. Pneumatic conveying of solids. A theoretical and practical approach (Powder technology series), 2nd Edition, Chapman&HallSuffolk, (1997), 624 p.
- Mills D., (2004), Pneumatic Conveying Design Guide, 2nd Edition, Bitterworth-Heineman, ISBN:0750654716., (2004), 638 p.
- Syomin D., Rogovoy A. Features of a working process and characteristics of irrotational centrifugal pumps. // Procedia Engineering, Volume 39, 2012, Pages 231–237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.029>.
- Syomin D., Pavljuchenko V., Maltsev Y., Rogovoy A., Dmitrienko D. Vortex mechanical devices in control systems of fluid mediums. // Polish academy of sciences branch in Lublin. TEKA. Commission of motorization and power industry in agriculture. Volume X. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, № 10. – P. 440-445.
- Syomin D., Rogovoy A. Power characteristics of superchargers with vortex work chamber // Polish academy of

sciences branch in Lublin. TEKA. Commission of motorization and power industry in agriculture. Volume XB. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, № 19. – 2010 - P. 232-240.

18. Syomin D., Rogovoy A. Mathematical simulation of gas bubble moving in central region of the short vortex chamber // Polish academy of sciences branch in Lublin. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on motorization, vehicle operation, energy efficiency and mechanical engineering Volume 12. No 4. Lublin-Lugansk. XB. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, V.12 No4. – 2012 - P. 279-284.
19. Molerus O. Overview: pneumatic transport of solids // Powder technology. – 1996. – Т. 88. – №. 3. – С. 309-321.

Роговий А.С. Энергетична ефективність пневмотранспортних установок.

На основі показників енергетичної ефективності промислового пневматичного транспорту, таких як питома витрата електроенергії на тонну переміщеного матеріалу й питома витрата електроенергії на тонну й метр переміщення, була зроблена систематизація й узагальнення досвіду створення пневмотранспортних установок. Для різних варіантів концентрації й продуктивності був проведений проектний розрахунок переміщення вугільного пилу по горизонтальному трубопроводі різної довжини для систем пневмотранспорту на основі різних наосів: транспортні аерозолоба, струминні насоси, установкi всмоктувальної дії, шлюзові, пневмогвинтові й пневмокамерні насоси.

Ключові слова: промисловий транспорт, енергетична ефективність, питома витрата електроенергії, пневматичний транспорт, насос.

Rogoviy A. Energy Efficacy Of Pneumatic Transport Plants

On the basis of power efficiency indexes an industrial pneumatic transport, such as electric power rate on ton of a moved material and electric power rate on ton and meter of moving, the systematization and generalizing of creation of the pneumatic transport plants experience was made. For different versions of concentration and productivity of moving cargo the design study of breeze moving on the horizontal pipeline of different length for pneumatic transport systems was made on the basis of miscellaneous pumps: transport aertroughs, jet pumps, negative pressure system, airlock, pneumatic screw and blow tanks pumps. According to electric power rate was detected, that worst have the jet pumps. Thus, the further perfecting of jet pumps, looking up of new engineering solutions grounded on more effective principles transfer of power, will allow to lower energy intensity and to improve the economical characteristics of an industrial pneumatic transport.

Keywords: industrial transport, energy efficacy, electric power rate, pneumatic transport, pump.

Роговий А.С. – к.т.н., доц., доцент кафедри «Теоретическая механика и гидравлика», ХНАДУ, м. Харьков, Украина, e-mail: asrogovoy@ukr.net

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецкая-Белецкая Н.Б.**