

А. А. БУРЯК, В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, Э. А. ЗЕЛЬДИНА, С. В. ТАРАСОВ  
(Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)

## СИСТЕМА КОНТЕЙНЕРНОГО ПНЕВМОТРАНСПОРТНОГО ТРУБОПРОВОДА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

На основі дослідження принципу перетворення енергії вітру з кінетичної в потенційну форму створена система трубоконтейнерного пневмотранспорту, у якій компресорні станції замінені модульними концентраторами повітряних потоків, що створюють необхідний для транспортування вантажів перепад тисків усередині трубопровідної магістралі.

На основе исследования принципа преобразования энергии ветра из кинетической в потенциальную, создана система трубоконтейнерного пневмотранспорта. Компрессорные станции в данной системе заменены модульными концентраторами воздушных потоков, которые создают необходимый для транспортировки грузов перепад давлений внутри трубопроводной магистрали.

Based on our research of the transformation of the kinetic energy of the wind into potential energy form, a capsule-pipe pneumatic transportation system was developed. In this system the compressor stations were replaced with the modular air streams concentrators, which create the differential pressure inside the trunk pipe-line, necessary for transporting a payload.

Существующие системы трубопроводного контейнерного пневмотранспорта относятся к энергоемким техническим агрегатам. Они потребляют электроэнергию, которая расходуется на создание перепада давлений на торцах движущегося контейнера или пневмовоза.

Перепад давления создается при помощи воздуходувных станций. В случае большой протяженности пневмопровода, система снабжается дополнительными компрессорами, тормозящими и восстанавливающими режим движения после прохода контейнером промежуточных бункерных отсеков.

Затраты на такие транспортные системы растут пропорционально длине магистрали.

Снижения энергоемкости, обычно, добиваются путем ограничения скорости движения контейнеров, путем уменьшения фрикционных потерь в колесном блоке опирания, спрямления трассы.

В двухтрубной системе контейнерного трубопроводного пневмотранспорта [1] карта пневматического режима предусматривает только сжатие воздуха при помощи основной и промежуточных воздуходувных станций. Контейнеры перемещаются под давлением сжатого воздуха, находящегося позади них. Воздушная масса, перед контейнерами вытесняется за счет энергии, отбираемой у станций.

В системе трубопроводного контейнерного пневмотранспорта, описанной в работе [2], потери давления, обусловленные большой длиной трассы и наличием промежуточных разгрузоч-

но-загрузочных станций, компенсируются дополнительными воздуходувными агрегатами.

В данной работе рассмотрена задача создания системы трубопроводного контейнерного пневмотранспорта с прямым использованием энергетического потенциала ветра для создания рабочего перепада давлений в магистрали.

Транспортный трубопровод разбивается на участки трубы без внутренних перегородок.

Эти участки размечены местами монтажа промежуточных ветроустановок, так называемых, раструбных модулей.

Раструбные модули представляют собой конфузорно-диффузорные устройства, то есть ветроустановки, не имеющие подвижных ветроприемных плоскостей, и не производящие преобразования энергии ветра в электричество или теплоту. Они являются концентраторами воздушных потоков, собирают рассеянную в воздушных течениях энергию, направляя ее не на исполнительный орган, а в выделенные объемы. Концентрация производится путем отклонения течений плоскостями поверхностей раструбов и дает возможность перераспределения потока, изменения направления его фронта и энергетическое форсирование.

Центральный канал модуля является объемом, в котором в зависимости от режима, создается зона повышенного давления при перекрытом канале и зона скоростного течения при открытом канале. Эти состояния газовой среды в объеме канала имеют практические следствия, выражающиеся в возможности переборки

достаточно больших количеств воздуха в трубопровод магистрали и обратно, в зависимости от режима.

Использование в качестве воздуходувных агрегатов ветряных модулей - концентраторов потока ставит мощность, прилагаемую к контейнеру, в зависимости от источника энергии с неустойчивыми параметрами. Влияние модулей не может создать давление такого уровня и постоянства, как работа турбовоздуходувок, компрессоров и вакуумных насосов. Но этот недостаток становится менее существенным при учете следующих факторов.

Суммарное действие на контейнер двух однонаправленных сил, толкающих и тяговых, повышает эффективность разработанного двигателя. Потребляемая энергия не приобрела еще стоимости от преобразований в другие виды, и является самой дешевой, какую только можно получить. Кроме того, для хорошего хода контейнера в большинстве случаев не требуется большой перепад давлений. Известно, что для перемещения тонного контейнера по горизонтальной трубе метрового диаметра достаточно перепада в  $0,01 \text{ кгс/см}^2$ .

В настоящее время имеется большой промышленный опыт использования вентиляторов и эжекторов для работы внутрицеховых контуров трубопроводного контейнерного пневмотранспорта, мощность которых может быть покрыта мощностью концентрированного ветрового потока.

Подвижное крепление модуля на стойке и флюгирование делает рассматриваемое устройство независимым от направления ветра.

Использование для предварительной концентрации воздушных потоков рельефа местности, а, именно, естественных отражающих плоскостей оврагов, холмов, лощин, лесопосадок, а также промышленного рельефа, то есть плоскостей стен заводских корпусов, узких проходов между цехами упрощает ситуацию. В данном случае допустимо использование также городского ландшафта - плоскостей жилых застроек спальных районов города, поскольку работа раструбных модулей не сопровождается шумами.

Перспективность неиспользованного до сих пор городского ветроэнергетического ресурса неопределима для равнинных районов, где потоки воздуха не имеют естественных препятствий.

Городской ландшафт преобразует прямой ветер, создает в многометровом приземном воздушном слое устойчивые зоны градиентов давления в достаточно большом угловом диа-

пазоне, которые пригодны для энергетической утилизации.

Важным свойством предлагаемой линии трубопроводного контейнерного пневмотранспорта является независимость энергоемкости системы от ее длины. Раструбные модули оперативно и локально компенсируют потери давления, вызванные перетеканием воздуха через манжетное уплотнение контейнера, через люки промежуточных загрузочно-разгрузочных станций и утечки в задвижках, затворах, кранах и т. п.

Благодаря снижению плотности воздуха перед контейнером заметно уменьшаются потери, связанные с сопротивлением перемещению вытесняемого воздуха и с поршневым эффектом.

На рис. 1 представлена схема модуля, настроенного на работу в режиме откачки.

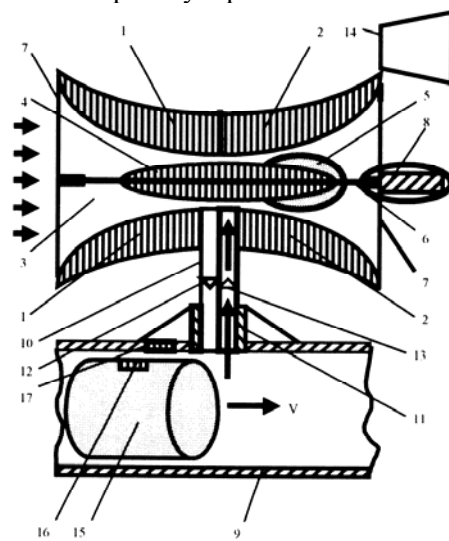


Рис. 1. Раструбный модуль в режиме откачки

Модуль состоит из конфузора 1 и диффузора 2, которые соединены герметично между собой. В образовавшемся канале 3 переменного сечения размещены два обтекателя 4 и 5 различного диаметра и профиля. Их поверхности сопряжены, но обтекатель 4 служит для сжатия потока, а обтекатель 5 выполняет функцию клапана. Узел из двух обтекателей укреплен на стержне 6, который проходит по центральной оси канала, раскреплен кронштейнами 7 и установлен с возможностью перемещения по стержню под действием толкателя электромагнита 8. Диаметр обтекателя 4 меньше минимального сечения канала 3 на величину пропускного зазора, а диаметр обтекателя 5 равен либо больше указанного сечения. Модуль укреплен на трубопроводе 9 при помощи стойки 10, которая может вращаться в ступице 11. В теле стойки выполнено два канала, служащих для перетока воздуха в полость трубопровода 9 и

обратно. В каналах установлены запорные клапаны 12 и 13, настроенные на противоточный пропуск воздуха. Флюгирование устройства осуществляется при помощи кия 14. В трубопровод помещен транспортный контейнер 15. Опорно-колесный и уплотнительный узлы стандартны и поэтому не показаны. В обшивку контейнера вмонтирован постоянный магнит 16, поле которого действует на датчик 17, связанный с электромагнитом 8.

Описанный раструбный модуль работает следующим образом. Воздушный поток попадает во входной растрв диффузора 1, скоростью напор сжимает и проталкивает его в канал 3. Первичная концентрация энергии усиливается далее тем, что обтекатель заставляет поток двигаться по зазору в самом узком сечении канала. Так как клапан 5 находится в исходном открытом положении, то поток с большой скоростью, превосходящей скорость ветрового фронта, проходит зазор, понижая давление на этом участке канала, и затем поступает в диффузор 2, где свободно расширяется. Поскольку срез канала стойки 10 находится в зоне пониженного давления, то клапан 13 открывается, а клапан 12 запирает поток. При этом создается режим устойчивого оттока воздуха из трубопровода 9 в канал 3 модуля. Отсос воздушной массы приводит к вакуумированию прилегающего участка трубопровода. Простой и прямолинейный маршрут отводимого потока не сопровождается значительными потерями, а сечение канала для каждого конкретного случая исполнения может быть легко оптимизировано.

Таким образом, для отвода больших воздушных масс из трубопровода не требуется больших энергетических избытков.

На рис. 2 приведен схематический чертеж модуля, положение обтекателя в котором переводит его в режим нагнетания.

По команде с движущего контейнера срабатывает электромагнит 8, толкатель которого перемещает совмещенные обтекатели 4 и 5 вдоль по стержню 6. Перемещение длится до того момента, когда обтекатель 5 упрется краями в поверхность канала 3 и перекроет его. Проприодимость канала 3 прекращается. Поэтому напор потока, сконцентрированного раструбами конфузора 1, повышает давление в рабочей зоне, вследствие чего клапан 12 открывается, а клапан 13 перекрывает поток. При этом начинается переток воздуха по каналу стойки 10 из канала 3 в объем трубопровода 9. Таким путем может быть повышено давление на участке трубопровода.

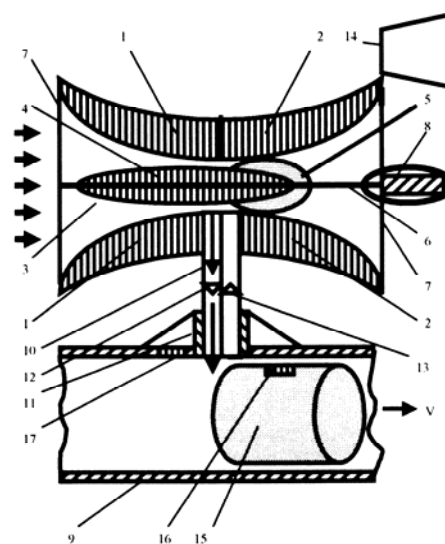


Рис. 2. Раструбный модуль при нагнетании

Схема распределения раструбных модулей по длине транспортного трубопровода показана на рис. 3.

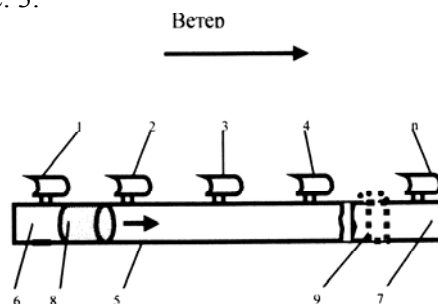


Рис. 3 Схема установки модулей

Модули 1-4-*n* установлены вдоль магистрали 5 на равном расстоянии друг от друга. Стартовый 6 и финишный 7 тупики трубы герметично закрыты. Контейнер 8 размещен на станции загрузки, которая находится между модулями 1 и 2. Станция разгрузки 9 размещена перед последним модулем *n*.

Пневмотранспортная магистраль фактически функционирует в автоматическом режиме, и программа транспортировки задается конструкцией ее узлов. Контейнер, находящийся на выходе из стартового тупика 6 загружается, а работающие модули 1 - *n* создают необходимое распределение давления воздуха вдоль трубы, которое поддерживается далее автоматической сменой состояний клапанов в модулях. В начальном положении газовый объем 6 позади контейнера имеет повышенное давление, поскольку модуль 1 работает в режиме нагнетания, то есть клапаны 5 и 12 открыты, а клапан 13 закрыт (рис. 2). В то же самое время модули, начиная со 2-го и кончая *n*-м, работают в ре-

жиме отсоса. Клапаны 5 и 13 открыты, а клапаны 12 закрыты (см. рис. 1).

Перемещаясь под действием суммарной силы, от повышенного давления сзади и разрежения спереди, контейнер переключает режим каждого следующего модуля, против которого оказывается в текущий момент движения, изменяя состояние клапанов. Переключение режима работы модулей производится путем перемещения обтекателей в два крайних положения, показанных на схемах рис. 1 и рис. 2. Перевод осуществляется при помощи электротолкателя 8, работающего от аккумулятора стартерного типа.

Контейнер делит трубу на два изменяющихся объема перед ним и позади него. Но если в начале транспортировки объем с избыточным давлением был намного меньше вакуумированного объема, то далее они выравниваются, а к финишу положение изменяется на противоположное. Но на всем пути неизменным остается одно: количество модулей на участке пропорционально его объему, поскольку они установлены равномерно по длине с одинаковым интервалом. Следствием этого является относительная стабильность перепада давления между обоими объемами.

В регионах с неустойчивыми ветрами целесообразно использовать комбинированные модификации линий трубопроводного контейнерного пневмотранспорта, энергетическая система которых включает как группу раструбных модулей, так и компрессорный узел. При достаточно сильном ветре используются только модульные источники энергии, а при отсутствии ветра - только компрессорная станция. Возможна также одновременная работа обеих энергетических систем для паритетной компенсации дефицита давления. Во всех метеорологических ситуациях кроме штилевой использование ветросилового системы дает энергетический выигрыш.

На наш взгляд, раструбные модули целесообразно использовать в магистралях обычных конструкций для получения разрежения воздуха перед движущимися контейнерами. Это улучшит динамику, смягчая поршневой эффект, уменьшит работу по вытеснению воздушного столба.

Для получения технических характеристик, пригодных для проектирования конкретных систем трубопроводного контейнерного пневмотранспорта, были проведены расчеты параметров газа в емкости при ее опорожнении через отверстие постоянной площади.

Расчетная схема рассматриваемого участка трубопровода представлена на рис. 4.

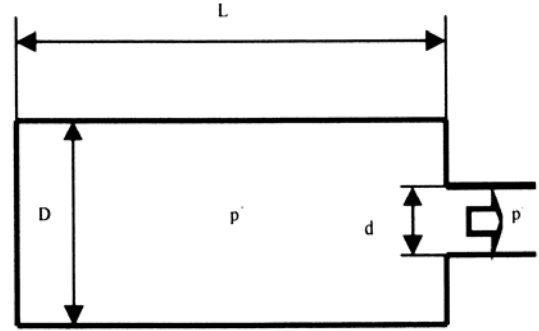


Рис. 4. Расчетная схема опорожнения трубопровода

Здесь  $L$  – длина участка;  $D$  – диаметр трубопровода;  $d$  – диаметр выходного отверстия;  $P^+$  и  $P^-$  – давление внутри трубы и на выходе соответственно.

Изменение во времени параметров газа в емкости постоянного объема при ее опорожнении описывается уравнением нестационарной термодинамики [3].

$$\frac{dP^+}{dt} = -\frac{k-1}{V} iG, \quad (1)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;

$i$  – энтальпия;

$G$  – расход газа через отверстие;

$V$  – объем участка трубопровода;

При постоянной температуре газа  $T = \text{const}$

энтальпия  $i = \frac{k}{k-1} RT$  ( $R$  – газовая постоянная).

Расход газа через отверстие в трубопроводе зависит от характеристик истечения, которое определяется соотношением входного  $P^+$  и выходного  $P^-$  давлений.

Для сверхкритического режима истечения газа  $\frac{P^-}{P^+} \leq \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  расход газа определяется по формуле

$$G = \frac{\mu f P^+}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(2 / (k+1)^{\frac{2}{k-1}}\right)},$$

где  $f$  – площадь выходного отверстия.

Для докритического режима истечения газа

$\frac{P^-}{P^+} \geq \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  расход из отверстия равен

$$G = \frac{\mu f P^+}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left( \left(P^- / P^+\right)^{\frac{2}{k}} - \left(P^- / P^+\right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}.$$

Обыкновенное дифференциальное уравнение (1) было проинтегрировано при начальном условии  $P^+(0) = P_a$  ( $P_a$  - атмосферное давление).

В проводимых расчетах варьировались все исходные параметры, за исключением диаметра трубопровода. Значение  $D$  было фиксированным и равнялось 1,2 м, что соответствует принятому размеру для промышленных пневмотранспортных трубопроводов.

Производительность модулей задавалась в виде показателя выходного давления воздуха  $P^- = 0,5 \text{ кг/см}^2$ , а время откачки – как время уравнивания давления по объему  $P^+$  с выходным давлением  $P^-$ .

Расчеты показали, что раструбные конфузоры можно устанавливать вдоль трубопровода с интервалом 100 м.

Об этом можно судить по времени откачки, которая зависит еще и от диаметра выходного отверстия  $d$  (рис. 5).

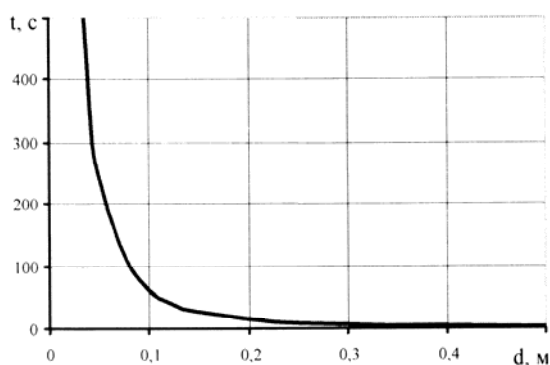


Рис. 5. Время опорожнения участка трубопровода

При диаметре  $d = 0,3$  м время уравнивания давлений составляет  $t = 6,76$  с; при  $d = 0,2$  м  $t = 15,2$  с; при  $d = 0,1$  м  $t = 60$  с.

При уменьшении перепада давлений время уравнивания увеличивается.

Для давления  $P^- = 0,24$  атм время уравнивания составляет 104 с при диаметре входного отверстия  $d = 0,1$  м, и 26 сек при  $d = 0,2$  м. При  $P^- = 0,125$  атм время равно 148 с для  $d = 0,1$  м и 37 с для  $d = 0,2$  м.

Наиболее приемлемыми размерами каналов для перетекания воздуха между модулями и трубопроводом можно считать диаметры в диапазоне 0,1-0,2 м. Время откачки 100-метрового участка трубопровода, таким образом, не выходит из минуты. Следовательно, скорость восстановления разрежения воздуха при

любых видах натекания в объем достаточно высока.

Следует уточнить, что время уравнивания давлений  $P^+$  и  $P^-$  на практике зависит от порывов ветра, поэтому оно дискретно и набирается в виде суммы импульсов времени срабатывания обратного клапана. Порции воздуха, удаляемые из объема трубы синхронны порывам ветра с инерцией запаздывания, но с полностью идентичными диаграммами. Поэтому реальная скорость вакуумирования трубопровода с заданным конечным разрежением может быть заметно больше теоретической. Для соответствия реальности время откачки, как минимум, удваивается. Но и это значение вполне эффективно и приемлемо для технической реализации идеи.

Работа раструбных конфузоров на откачку связана с таким параметром движения воздушного потока, как коэффициент ускорения, зависящий от отношения входного сечения к минимальному. Увеличение скорости может достигать значений на порядок, и даже на два порядка, превосходящих скорость ветра. Это дает возможность получить достаточный перепад давлений.

Поскольку участки разделены только условно, то работа всех модулей интегрируется. Это дает возможность использовать ветер там, где он есть на нужды всей магистрали. Если протяженность трубопровода составляет несколько километров, то всегда найдутся зоны, порывы ветра в которых достигают достаточной для срабатывания обратных клапанов скорости.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров Ф. М. Контейнерный трубопроводный пневмотранспорт. - М.: Машиностроение. 1979. - 350 с.
2. Заявка RU №93018062, МПК<sup>6</sup> В65G 1/00. Система трубопроводного контейнерного пневмотранспорта / Ю. М. Алференков, И. И. Волянский, Ю. А. Яшин, М. А. Фельдман. - Оpubл. 20. 10. 1995.
3. Беляев Н. М. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов. / Н. М. Беляев, Н. П. Белик., Е. И. Уваров - М.: Машиностроение. 1979. -232 с.

Поступила в редакцию 27.07.2007.