

Д. т. н. С. Я. Давыдов¹ (✉), д. т. н. В. Н. Макаров¹, д. х. н. Р. А. Апакашев¹,
к. т. н. Н. В. Макаров¹, д. т. н. Г. Г. Кожушко²

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
Екатеринбург, Россия

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»,
Екатеринбург, Россия

УДК 621.867.81./85

УНИВЕРСАЛЬНОЕ БУСТЕРНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ПОДЪЕМА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ДВУХ- И ТРЕХФАЗНЫХ ПОТОКАХ

Рассмотрен универсальный вариант бустерного устройства для подъема транспортирующей среды с присутствием кусковых материалов. Приведены расчетные формулы для определения зависимости скорости движения трехфазной среды в пульпопроводе с турбовихревым движением пульпы, а также для определения дополнительного объема воздуха, подаваемого через бустерное устройство в пульпопровод. Разработка относится к устройствам для транспортирования и подъема сыпучих и жидких сред в двух- и трехфазных потоках и может быть использована в строительной, металлургической, горнорудной и других отраслях промышленности.

Ключевые слова: подъем сыпучих и жидких сред, бустерное устройство, двух- и трехфазный поток, пульпоподъемное устройство.

Для литейного цеха Альметьевского насосного завода («Алнас», г. Альметьевск, Татарстан) в системе пневмотранспорта литейных песков использованы бустерные устройства

конструкции предприятия «Кристалл-полюс» (г. Набережные Челны, Татарстан), установленные по длине транспортного трубопровода [1]. Устройство (рис. 1) [2] в виде вставки в транс-

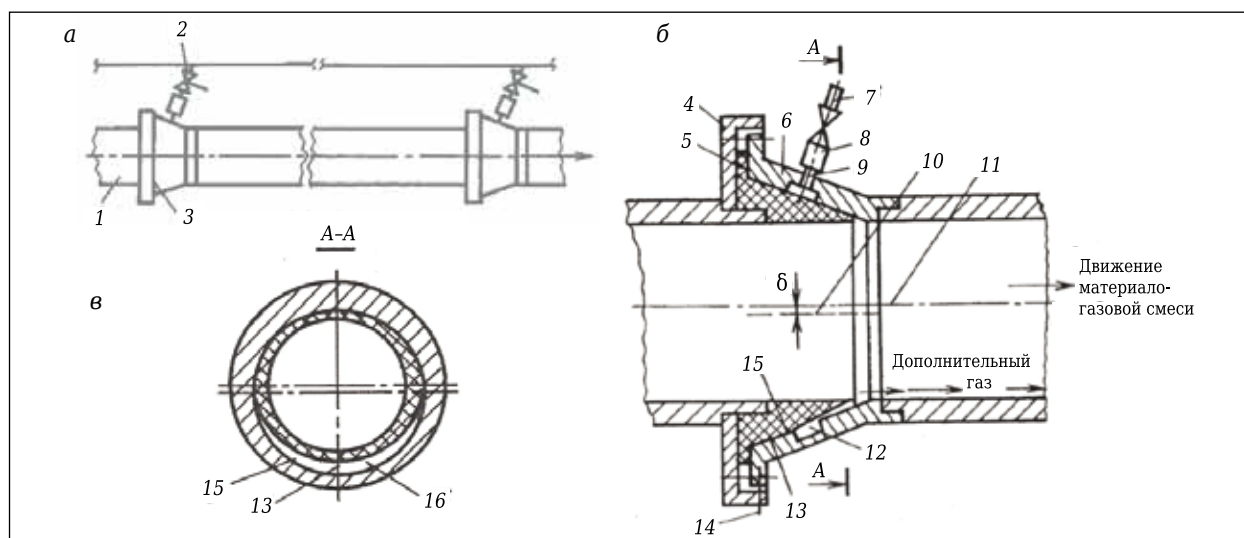


Рис. 1. Устройство для транспортирования абразивных материалов: а — участок транспортного трубопровода; б — бустер; в — щелевое отверстие; 4 — прижимной фланец; 7 — регулировочный вентиль; 8 — обратный клапан; 10 — смещенная ось; 11 — ось трубопровода; 13 — конусная поверхность; 14 — регулировочные болты; 15 — внутренняя поверхность опорного фланца б. Остальные обозначения — в тексте



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

портном трубопроводе для пневмотранспорта абразивных сыпучих материалов (формовочных песков КамАЗа) включает трубопровод 1 с патрубками 2 для дополнительного подвода транспортирующего сжатого воздуха в бустеры 3.

Дополнительный транспортирующий сжатый газ подается через патрубки 2 и воздухоподводящие отверстия 9 каждого опорного фланца 6 в кольцевую выточку 12, в которой равномерно распределяется, создавая по всему периметру одинаковое давление. Преодолевая сопротивление конусного конца упругой вставки 5, который в верхней части прижат опорным фланцем 6 больше, чем в нижней, сжатый газ распределяется тонким слоем по нижней внутренней стенке транспортного трубопровода, защищая его от абразивного износа. В аварийных ситуациях при возникновении пробки из транспортируемого материала в трубопроводе создается обратный перепад давления. В этом случае упругая вставка 5, приобретая изначальное положение, играет роль обратного клапана, не пропуская материалогазовую смесь в кольцевую выточку 12 и магистраль подачи газа. Учитывая, что скорость материалогазовой смеси увеличивается по длине трубопровода, подача сжатого газа должна снижаться за счет уменьшения сечения поперечной щели 16.

Наличие поперечного щелевого отверстия 16, перекрытого конусной упругой вставкой 5 в верхней части опорного фланца с возможностью образования этого сквозного щелевого отверстия в нижней части опорного фланца 6 (за счет деформации упругой вставки 5 при подаче сжатого

газа через его кольцевую выточку 12), позволяет перераспределить сжатый газ. При пропуске дополнительного количества сжатого газа преимущественно по нижней внутренней части трубопровода экономится расход газа и увеличивается дальность транспортирования материала без соприкосновения со стенками трубы. Регулирование поперечного сечения щелевого отверстия 16 позволяет организовать работу системы пневмотранспорта с пониженными затратами сжатого газа.

Выполнение вышеописанных мероприятий для транспортирования сыпучих материалов обеспечит снижение энергозатрат пневмотранспорта за счет уменьшения расхода воздуха и повышения концентрации абразивных материалов при понижении скорости воздуха, а также позволит транспортировать материалы на расстояние до 2,5 км.

Задача предлагаемой разработки — использование бустерного устройства для наладки подъемного устройства, что позволит повысить устойчивость режима и производительность его работы, сократить расход энергозатрат. Подъемное устройство (рис. 2) содержит [3, 4] смесительную камеру 1, в стенке 2 которой выполнены два кольцевых ряда 3 и 4.

Для подачи сжатого воздуха в поток (материаловоздушной смеси) смесительной камеры 1 кольцевой ряд 4 снабжен сквозными отвер-

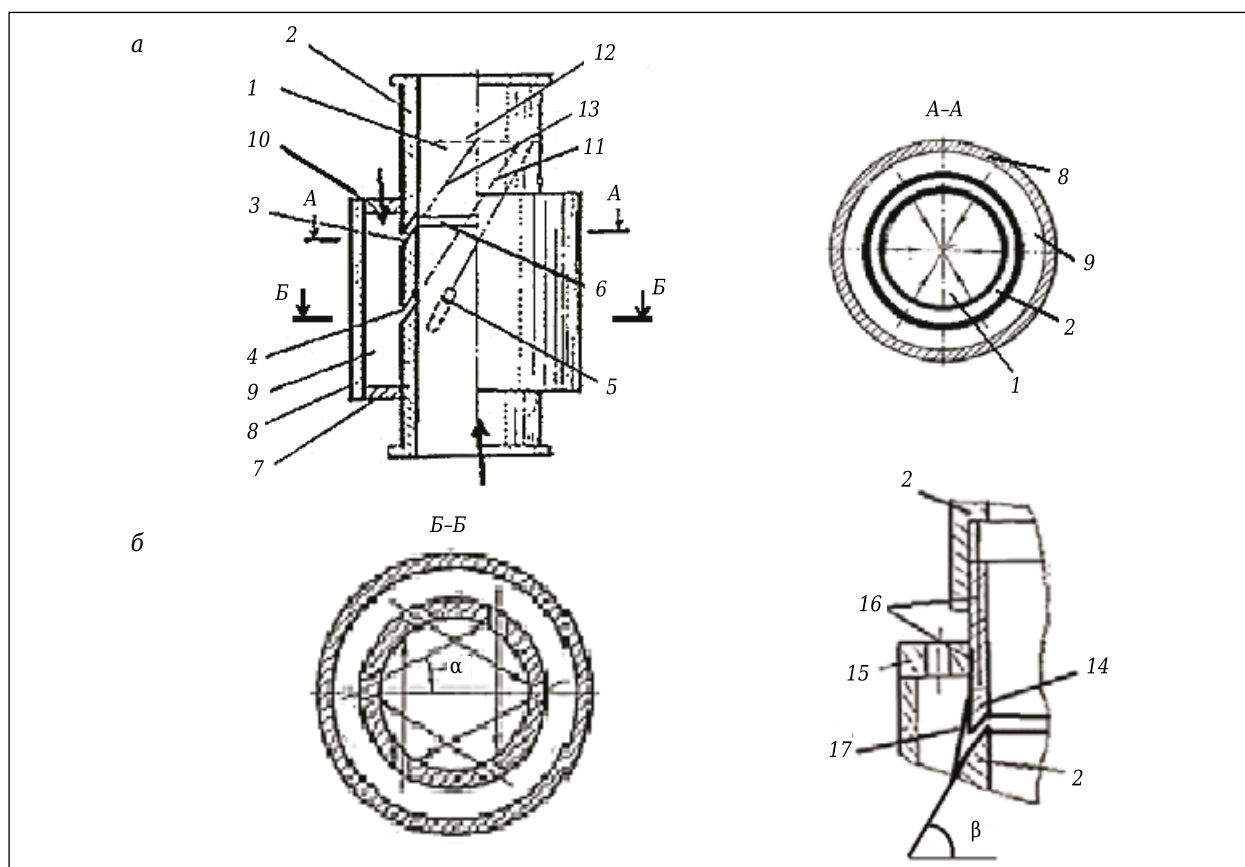


Рис. 2. Схема подъемного устройства: а — общий вид устройства; б — узел резьбового крепления кольцевого патрубка 14 к фланцу 15 секции 7 нагнетания воздуха. Остальные обозначения — в тексте

ствиями 5, а кольцевой ряд 3 — сквозной поперечной щелью 6. Вокруг смесительной камеры 1 установлена секция 7, выполненная в форме цилиндра. Стенка 8 этого цилиндра создает щелевой круговой зазор 9 вокруг стенки 2 смесительной камеры 1. Для впуска сжатого воздуха от источника (на рис. 2 не показан) в круговой зазор 9 секция 7 снабжена отверстием 10. Ось 11 каждого отверстия 5 в первом ряду по направлению потока среды выполнена с наклоном к поперечному сечению 12 и продольной оси смесительной камеры. При этом размер поперечного сечения отверстий не превышает половины толщины стенки 2 смесительной камеры 1. Установлено, что в этом случае длина каналов устраняет образование локальных завихрений в подаче жидкости.

Сквозная поперечная щель 6 во втором кольцевом ряду 3 в стенке камеры 1 смещения выполнена с наклоном 13 по потоку движения среды к поперечному сечению 12 и продольной оси смесительной камеры. Второй кольцевой ряд 3 снабжен вставкой в виде патрубка 14, который выполнен подвижно по вертикали вдоль стенки 2 и съемного фланца 15 секции 7 для возможности изменения сквозной поперечной щели 6, например с помощью регулировочного резьбового соединения 16.

В процессе исследований и использования в эксплуатации предлагаемого решения диаметр сквозных отверстий 5 можно определить по формуле [5, 6]:

$$d_k = 21,84 \sqrt{\frac{l_k v_{\text{в}} P_{\text{аб}}}{RT_{\text{аб}}}},$$

где d_k — диаметр отверстий, м; l_k — длина канала отверстий, м; $v_{\text{в}}$ — скорость движения сжатого воздуха, м/с; $P_{\text{аб}}$ — абсолютное давление сжатого воздуха, МПа; R — универсальная газовая постоянная, для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К); $T_{\text{аб}}$ — абсолютная температура воздуха, К.

Ширину сквозной поперечной щели 6 $h_{\text{щ}}$ можно определить по зависимости [5, 6]

$$h_{\text{щ}} = 0,25 d_{\text{в}}^2 / d_{\text{н}},$$

где $d_{\text{в}}$ — внутренний диаметр смесительной камеры 1, м; $d_{\text{н}}$ — диаметр наружной стенки смесительной камеры, м.

Сжатый воздух поступает через отверстия 10 фланца 15 в щелевой круговой зазор 9 секции 7. В круговом зазоре 9 сжатый воздух проходит в смесительную камеру 1 через сквозные отверстия 5 и сквозную поперечную щель 6 стенки 2. Подача сжатого воздуха через отверстия 5 кольцевого ряда 4 приобретает поступательное движение, образуя кольцо высокого давления на движущийся двухфазный транспортный поток.

Наладка подъемного устройства на повышение устойчивости режима и производительности

обеспечивается изменением сквозной щели 6 путем сдвигания подвижного патрубка 14 по вертикали вдоль стенки 2 смесительной камеры 1, например с помощью резьбового соединения 16. Использование регулируемой сквозной щели 6 в стенке 2 смесительной камеры 1 позволяет изменять в ней сплошной кольцевой силовой поток в зависимости от пропускной способности подъемного устройства. Сетка 17 предназначена для улавливания загрязнений сжатого воздуха, например масла и других примесей, и может быть выполнена из стеклоткани, пористых тканей или пористой газопроницаемой фильтровальной сетки (сетка СД56-12Х18Н9Т по ГОСТ 3187-76 — сетка саржевого переплетения двухсторонняя № 56 из проволоки 12Х18Н9Т). Сетка для защиты отверстий апробирована на предприятиях России.

Использование регулируемого сквозного щелевого отверстия 6 в транспортных трубопроводах позволило создать сплошной кольцевой силовой поток в вертикальных транспортных потоках сыпучих и жидких сред. Поток способен передать как сыпучие материалы (песок, гравий, щебень и др.), так и жидкие среды с крупными включениями. Транспортирующая среда приобретает вращательное и поступательное движение; создается так называемый «искусственный вихрь». Этот процесс достигается за счет расположения каналов в смесительной камере по меньшей мере в два кольцевых ряда, расположенных один за другим.

Углы β , образованные по оси каждого канала, с плоскостью поперечного сечения камеры смещения составляют 60–70 град. Это обеспечивает наилучшие условия формирования «искусственного вихря» и устраняет образование локальных завихрений в потоке двухфазной среды. Углы α , образованные плоскостью, проходящей через продольную ось камеры и точку, в которой оси соответствующих каналов пересекают внешнюю поверхность смесительной камеры, составляют 29–31 град. Угол, который образует щель 6, составляет 60–70 град. Угол создает зону высокого давления вдоль продольной оси смесительной камеры и обеспечивает более полное использование его площади поперечного сечения. Такое расположение каналов позволяет создать «искусственный вихрь» в смесительной камере, который увеличивает уровень всасывания (например, при всасывающем режиме) почти в 3 раза и за счет устранения потерь из-за местных завихрений.

Снижение плотности трехфазной среды и, как результат, возникновение гидростатической силы, перемещающей пульпу в классическом эрлифте [7, 8], происходят исключительно за счет смешивания пульпы с воздухом, обладающим малой плотностью. При этом потенциальная энергия воздуха полностью диссипирует в процессе смешивания с пульпой.

Применение осе-тангенциально-бустерных устройств, оптимально распределенных по высоте пульпопровода выше смесителя, позволяет не только дополнительно увеличить гидростатическое давление, но и сформировать гидродинамические поверхностные объемные силы для повышения энергоэффективности подъема пульпы в турбовихревом подъеме.

Скорость движения трехфазной среды V_c в пульпопроводе турбовихревого эрлифта определяется по формуле

$$V_c = \frac{4W_b(z) + W_{ж} + W_m}{\pi D^2},$$

где $W_b(z)$ — производительность пульпопровода по воздуху, $W_b(z) = W_{вс} + k_r v_{вп} D (\sin \beta \cos \alpha + \sin \alpha \cos \beta) z$, м³/с; $W_{ж}$ — производительность пульпопровода по воде, м³/с; W_m — производительность пульпопровода по сыпучему материалу, м³/с; D — диаметр пульпопровода, м; z — текущая координата по оси пульпопровода, м; $W_{вс}$ — производительность смесителя пульпопровода по воздуху, м³/с; β , α — углы наклона каналов подачи воздуха бустерного устройства в плоскостях, параллельных и перпендикулярных оси трубопровода, град; k_r — коэффициент густоты вихревых камер каналов подачи воздуха бустерного устройства.

Из уравнения скорости движения трехфазной среды видно, что скорость транспортирования турбовихревого подъема возрастает линейно за счет снижения ее плотности от подачи воздуха через бустерное устройство. Удельная гидродинамическая поверхностная сила давления P_d , создаваемая воздухом бустерного устройства, определяется по формуле

$$P_d = \frac{\rho_v}{2} V_b^2 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha,$$

где ρ_v — плотность воздуха, кг/м³; V_b — скорость воздуха в буфере, м/с.

Удельную гидродинамическую объемную силу разрежения с учетом теоремы Остроградского – Гаусса получаем в виде

Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Анализ основных направлений развития пневмотранспортных установок / С. Я. Давыдов, И. Д. Кашеев // Новые огнеупоры. — 2003. — № 10. — С. 38–42.
2. **Пат. 2252908 Российская Федерация.** Устройство для пневматического транспортирования сыпучих материалов / Давыдов С. Я., Рукомойкин А. А., Пономарев А. В. — № 2003120338 ; заявл. 02.07.03 ; опубл. 27.05.05, Бюл. № 15.
3. **Pat. 4028009 US.** Jet pump (струйный насос) ; June 7, 1977.
4. **Пат. 2709996 Российская Федерация.** Подъемное устройство / Семин А. Н., Давыдов С. Я. — № 2018136010 ; заявл. 11.10.18 ; опубл. 23.12.19, Бюл. № 36.
5. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта вчера, сегодня, завтра:

$$P_b = \pi \rho_v V_b^2 \cos^2 \beta \sin^2 \alpha.$$

С позиции гидродинамической аналогии обе последние формулы отражают снижение удельного веса трехфазной среды за счет распределенного действия поверхностной P_d и массовой (объемной) силы P_b в направлении, противоположном силе тяжести, без увеличения ее объема. С учетом принципа действия подъемника вышеуказанное соответствует увеличению его потенциальной энергии.

Дополнительный объем воздуха ΔW_b , м³/с, подаваемый через бустерное устройство в пульпопровод, может быть рассчитан по формуле

$$\Delta W_b = k_r V_b \pi D (\sin \beta \cos \alpha + \sin \alpha \cos \beta) H,$$

где H — высота транспортирования пульпы, м.

Рациональное распределение воздуха, подаваемого в бустерное устройство, позволяет существенно повысить производительность и высоту подъема транспортируемого материала. При фиксированном расходе воздуха увеличение его скорости на выходе из бустерного устройства в 3 раза повышает его гидравлический КПД — на 12 %, высоту подъема на 20 %, производительность не менее чем на 10 %.

Предлагаемая разработка может быть использована также для перекачивания шлама из буровых скважин. Транспортирующая среда, проходящая через указанные каналы, будет приобретать вращательное и поступательное движение, создавая так называемый «искусственный вихрь». Устройство может работать при наличии в транспортирующей жидкости крупных включений.

Предлагаемое устройство для транспорта абразивных материалов приводит к увеличению пропускной способности и сокращению расхода сжатого воздуха до 30 % на предприятиях цветной и строительной промышленности, например на Богословском и Каменск-Уральском алюминиевых заводах и на цементных предприятиях России.

теория, расчет, исследования, производство / С. Я. Давыдов, А. Н. Семин. — М. : Фонд «Кадровый резерв», 2016. — 472 с.

6. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов : исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
7. **Гейер, В. Г.** Эрлифтные установки : уч. пособие / В. Г. Гейер, Л. Н. Козыряцкий, В. С. Пашенко, Я. К. Антонов. — Донецк : ДПИ, 1982. — 63 с.
8. **Муравьев, И. М.** Основы газлифтной эксплуатации скважин / И. М. Муравьев, В. И. Ямпольский. — М. : Недра, 1973. — 185 с. ■

Получено 20.02.20

© С. Я. Давыдов, В. Н. Макаров, Р. А. Апакашев, Н. В. Макаров, Г. Г. Кожушко, 2020 г.