

Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), д. т. н. В. Н. Макаров, к. т. н. Н. В. Макаров

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

УДК 622.691:66.47.75].017:533.6

## МОДИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ И АЭРОДИНАМИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГОРЯЧИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Приведены варианты пневмотранспорта с температурными данными материала. Перечислены методы защиты контейнера от теплового нагрева. Разработано разгрузочное устройство грузовых контейнеров трубопроводного транспорта горячих сыпучих материалов. Предложенная система двух интегральных уравнений позволит с достаточной точностью рассчитать требуемое давление сжатого воздуха, геометрические параметры аэродинамических гребней для заданной длины участка разгрузки вращающихся контейнеров и скорости их поступательного движения. Наличие аэродинамических гребней позволяет снизить потери энергии от трения при движении контейнеров по спирали.

**Ключевые слова:** горячий сыпучий материал, пневмотранспорт, температура материала, сопло для переворота груженых контейнеров.

Технологические переделы (глинозем, агломерат, окатыши, шлак, огарок, клинкер, спек, кокс и др.) имеют высокую начальную температуру — до 1000 °С и выше. Для использования транспорта горячие материалы охлаждаются, как правило, непосредственно у печей с тем, чтобы передать на следующий передел, потребителю, на склад или в отвал в охлажденном состоянии. Узлы охлаждения дороги, громоздки и энергоемки. Транспортирование горячих или полуохлажденных материалов позволит отделить узлы охлаждения от агрегата, оснастить их оборудованием для утилизации теплоты или сохранить энтальпию продукта до следующего передела.

По запросу АО «БСК», Башкортостан, была выполнена работа по замене скребкового конвейера на трубопроводный транспорт для перемещения взрывоопасных и пожароопасных горячих сыпучих материалов (кальцинированная сода марки Б) с температурой 160 °С со следующими параметрами: производительность 60 т/ч, дальность подачи 160 м, высота подъема 37 м, плотность материала 2530 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность материала 550 кг/м<sup>3</sup>, угол естественного откоса материала 29–40 град.

По запросу ИнКомЭнергоцветмета выбран вид трубопроводного транспорта для перемещения горячих сыпучих материалов (глинозема) с температурой 400 °С при производительности не менее 25 т/ч и дальности подачи (приведенной) 150 м. В табл. 1 указаны варианты пневмотранспорта с температурными данными материала [1–5]. Из табл. 1 видно, что по условиям производства подходят пневмовинтовые насосы (от пневмотранспорта с камерными питателями заказчик отказался).

Пневмовинтовые насосы были использованы на Березниковском заводе для перемещения горячей соды с температурой 160 °С на расстояние 280 м [3–5]. Пневмотранспорт для подачи

Таблица 1. Варианты пневмотранспорта с температурными данными материала

Пневмотранспорт	Температура материала, °С	Дальность подачи, м
Вакуумный	300	100
Струйный	150	150
С камерными питателями	150	3500
Пневмовинтовые насосы	400	1500

колошниковой пыли с температурой 170–250 °С из пылеуловителя в летки домы был применен на Нижнетагильском металлургическом комбинате [4, 5]. В ходе испытаний было установлено, что технические проблемы транспортировки решаются лишь при дозированной подаче пыли в транспортирующий пневмопровод. Из-за пиррофорных свойств при использовании конвертер-



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

ной пыли необходимо соблюдать специальные требования техники безопасности. Необходимым условием является продувание установки азотом сразу после включения и за 1 сут до повторного пуска (табл. 2).

Для обжигового отделения завода по производству легкого заполнителя Норильского ГМК от холодильника обжигового агрегата до бункеров готовой продукции был разработан вакуумный транспорт азерита с температурой до 100 °С [4, 5]. При температуре до 400 °С могут работать пневмовинтовые насосы (<http://www.metaltex.ru/files/pneumotransport.pdf>) [4, 5]. Известные вакуумные системы могут применяться для пневмотранспорта разных материалов на расстояние до 100 м с концентрацией пыли до 40 кг/кг и температурой до 300 °С. Производительность вакуумных систем может достигать 50 м³/ч. Удельный расход электроэнергии обычно составляет от 3 до 12 кВт на 1 т транспортируемого материала [4, 5]. Преимущества вакуумной системы — малые габариты приемных устройств и простота обслуживания, недостатки — высокий удельный расход электроэнергии при работе вакуум-насосов и потери тепловой энергии при работе паровых эжекторов, имеющих обычно невысокую эффективность.

При разработке схем контейнерного трубопроводного транспорта необходимо учитывать специфику того пирогидрометаллургического процесса, куда направляются горячие грузы. Например, для плавильных процессов желательно сохранить максимально возможный тепловой потенциал, аккумулируемый материалом на стадии подготовки (обжиг, агломерация). Для исключения из технологических схем процесса охлаждения горячих сыпучих материалов и экономии энергии на их нагрев предусмотрена тепловая защита контейнеров [4, 5].

Футеровку из шамотного бетона на жидком стекле рекомендуется применять для тепловой защиты стенок контейнеров при транспортировании горячих материалов с температурой 700–800 °С. Периклазохромитовую массу используют до температуры 1300 °С. Как правило, температура горячего материала не превышает 800 °С. В этих условиях шамотная масса предпочтительнее благодаря пониженной на 50–60 % теплопроводности и на 25 % плотности.

Значения коэффициентов контактного теплообмена между слоем материала (например, агломератом) с температурой до 1300 °С и стальными поверхностями приведены ниже [6]:

Температура слоя материала, °С.....	300	500	700	900	1100	1300
Коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К).....	124	188	272	381	517	694

Наиболее предпочтительным является вариант, когда на внутреннюю поверхность грузо-

Таблица 2. Параметры установок пневмотранспорта фирмы Klockner Stahltechnik, Германия

Показатели	Колошниковая пыль	
	из электро-фильтра	из теплообменника
Насыпная плотность пыли, кг/м³	500–1500	2500–3000
Крупность частиц, мкм	>1 (90 %)	60–80
Температура пыли, °С	300	450
Количество пыли, кг/ч	360	240
Дальность транспортирования, м	120	60

\* Количество подаваемого азота 10 м³/мин.

вой емкости 4 (рис. 1) контейнера настилают волокнистую плиту 2 (табл. 3) из каолиновой ваты МКРП-300. Для предохранения от механического разрушения теплоизоляционную плиту 2 укрывают листом 3 (отбойным щитом) из жаропрочной стали. В табл. 3 приведены параметры контейнеров с тепловой защитой в зависимости от диаметра трубопровода.

В качестве теплоизоляции контейнера принята волокнистая плита из каолиновой ваты. Температура  $t_{ст}$ , °С, наружной поверхности стенки контейнера определяется из следующей зависимости:

$$t_{ст} = \frac{C_m \rho_n (t_r - \bar{t}_1) D_1^2}{4 \alpha_{вн} \tau_0 D_2} + t_{окр},$$

где  $C_m$  — средняя теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho_n$  — насыпная плотность груза, кг/м³;

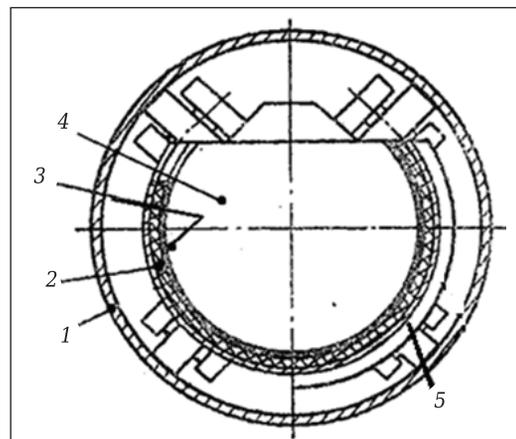


Рис. 1. Контейнер с теплоизоляцией: 1 — трубопровод; 2 — теплоизоляционная плита; 3 — отбойный щит; 4 — грузовая емкость; 5 — винтообразный копиер

Таблица 3. Параметры контейнеров с тепловой защитой

Диаметр трубопровода, мм	Внешний диаметр контейнера, мм	Масса контейнера, кг	Длина контейнера, мм	Площадь поперечного сечения груза, м²
630	480	154	1,2	0,123
820	630	321	1,8	0,208
1020	720	372	2,1	0,222
1220	820	803	2,4	0,461

$t_r$  — температура груза, загруженного в контейнер, °С;  $t_1$  — среднемассовая температура груза, °С;  $D_1$  и  $D_2$  — внутренний и наружный диаметр контейнера м;  $\alpha_{вн}$  — коэффициент теплообмена между поверхностью контейнера и окружающим воздухом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\tau_0$  — время движения контейнера в трубопроводе, с;  $t_{окр}$  — температура окружающей среды, °С.

Для работы при температуре 287 °С контейнер можно выполнить из обычной углеродистой стали.

Разгрузочное устройство грузовых контейнеров трубопроводного транспорта [7] содержит транспортный трубопровод 1 (рис. 2) с участком разгрузки 2 контейнеров 3. Подвод сжатого воздуха по патрубку 4 предназначен для движения контейнеров 3 по трубопроводу 1. Сопло 5 для переворота грузеных контейнеров 3 вокруг оси трубопровода 1 смонтировано на разгрузочном участке 2. Монтированные на контейнерах 3 винтообразные копиры 6 снабжены перпендикулярно прикрепленными аэродинамическими гребнями 7. Сопло 5 подачи сжатого воздуха на участке разгрузки 2 направлено перпендикулярно аэродинамическим гребням 7, закрепленным на корпусе контейнера, причем сопло 5 и патрубок 4 подвода сжатого воздуха объединены обводным трубопроводом 8 для сообщения их полостей.

Контейнеры 3 под действием сжатого воздуха, подаваемого по патрубку 4, перемещаются по трубопроводу 1 до разгрузочного участка 2. На разгрузочном участке 2 контейнеры 3 двигаются в состыкованном положении друг к другу. В результате поочередного прохода потока сжатого воздуха через сопло 5 к аэродинамическим гребням 7 происходит поворот грузовых емкостей контейнеров до разгрузочного и далее до исходного транспортного положения. Разворот контейнеров 3 до разгрузочного положения и обратно происходит путем силового воздействия струи сжатого воздуха из сопла 5

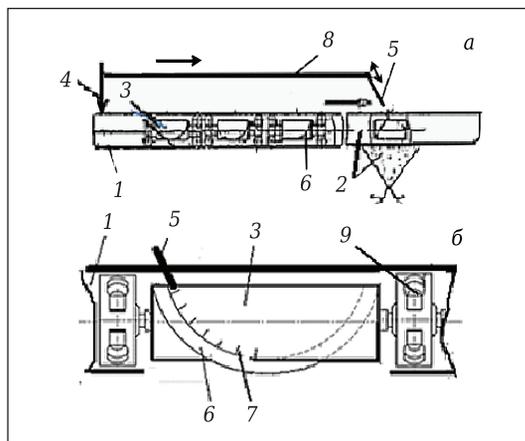


Рис. 2. Схема движения контейнеров через разгрузочный участок (а) и контейнер на участке разгрузки (б)

перпендикулярно аэродинамическим гребням, которые прикреплены на винтообразных копирах 6. Подвод сжатого воздуха на сопло 5 обеспечивается за счет наличия обводного трубопровода 8, объединяющего полости патрубка 4 подачи сжатого воздуха и полости сопла 5. При этом сопло 5 имеет возможность передвигаться по вертикали при продвижении колесных опор 9 контейнеров 3. Скорость  $v$ , м/с, движения контейнеров с учетом потерь сыпучего материала при разгрузке [4–8]:

$$v = 180L / [\pi(\alpha/\omega + 57,3t)],$$

где  $L$  — длина участка разгрузки вращающихся контейнеров, м;  $\alpha$  — угол поворота контейнеров по спирали в момент его полной разгрузки при максимальной угловой скорости  $\omega$  составляет 198,3 град;  $\omega$  — угловая скорость вращения контейнеров при разгрузке, рад/с;  $t$  — время разгрузки контейнеров, с.

При разгрузке каждого грузеного контейнера потоком сжатого воздуха необходимо учитывать силовое воздействие его струи на преодоление сил сопротивления вращения в цапфах опор. Проблемой известных решений является то, что механическое взаимодействие упорного устройства контейнеров для их разворота вокруг оси с винтообразным копиром на транспортном трубопроводе усложняет конструктивное исполнение самих контейнеров, не дает возможность уменьшить длину участка разгрузки и возврата контейнеров в исходное транспортное положение и уменьшает надежность работы всего трубопроводного транспорта. Трение при взаимодействии упорного устройства контейнеров с винтообразным копиром на транспортном трубопроводе требует значительных энергозатрат.

Технический результат разработки — увеличение надежности работы разгрузочного участка трубопроводного транспорта, уменьшение скорости разгрузки контейнеров и энергозатрат при развороте загруженных контейнеров по винтовой линии вокруг оси транспортного трубопровода.

Для построения математической модели динамики вращательного движения контейнеров при разгрузке приняты следующие допущения:

- скорость движения контейнеров при их разгрузке:  $v = \text{const}$ ;

- момент инерции  $J(t)$  контейнеров при разгрузке изменяется пропорционально угловой скорости их вращения:  $J(t) = J_0 - k_i \omega(t)$ , где  $J_0$  — момент инерции контейнера с полной загрузкой, кг·м<sup>2</sup>;  $k_i$  — коэффициент пропорциональности, кг·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;

- момент аэродинамической силы от действия сжатого воздуха  $M_0$  вращающегося контейнера — постоянная величина на отрезке времени  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ , при котором угловая скорость

вращения контейнера достигает максимальной величины ( $t_1$  и  $t_0$  — время достижения максимальной скорости вращения контейнеров и начала вращения, с);

– момент аэродинамической силы от действия сжатого воздуха  $M_1$  на отрезке времени  $\Delta t_2 = t_2 - t_1$  равен нулю, при этом в момент времени  $t_2 \omega = 0$ ;

– момент трения (сопротивления) от вращательного движения контейнеров  $M_{тр}$ , Н·м, пропорционален его массе, т. е. угловой скорости вращения:

$$M_{тр}(t) = M_{тр}^0 - k_{тр} \cdot \omega(t), \quad (1)$$

где  $k_{тр}$  — коэффициент пропорциональности, кг·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>.

С учетом принятых допущений выражение для угловой скорости и ускорения вращения контейнеров примет вид:

$$\omega t = \frac{1,1\pi v}{L - 0,32tv}, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(t) = \frac{0,35v^2}{(L - 0,32tv)^2}. \quad (3)$$

Используя модифицированное уравнение Мещерского [1] применительно к вращательному движению контейнера переменной массы (момента инерции), с учетом выражений (1)–(3) получим систему двух интегральных уравнений динамики движения контейнера по спирали Архимеда:

$$\frac{d}{dt}(J(t) \cdot \omega) = M_0(t) - M_{тр}(t) = M_a, \quad (4)$$

$$\frac{dJ(t)}{dt} \omega - J(t) - \frac{d\omega}{dt} = M_0(t) - M_{тр}(t), \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & 0,35J_0\pi v^2 \int_{t_0}^{t_1} \frac{dt}{(vt_1 - 0,32vt)^2} - 0,76k_{тр}\pi^2 v^3 \int_{t_0}^{t_1} \frac{dt}{(vt_1 - 0,32vt)^3} = \\ & = M_0 t_1 - 1,1k_{тр}\pi v \int_{t_0}^{t_1} \frac{dt}{vt_1 - 0,32vt}, \quad (6) \\ & 0,35J_0\pi v^2 \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{(vt_2 - 0,32vt)^2} - 0,76k_{тр}\pi^2 v^3 \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{(vt_2 - 0,32vt)^3} = \\ & = -1,1k_{тр}\pi v \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{vt_2 - 0,32vt}, \end{aligned} \right.$$

при этом  $L = L_1 + L_2 = v(\Delta t_1 + \Delta t_2)$ , где  $L_1$  и  $L_2$  — длина участков разгрузки, соответствующих времени  $t_1$  и  $t_2$ , м;  $t_0 = \varphi_0 = 0$ ;  $t_1 \rightarrow \omega_{max}$ ,  $t_2 \rightarrow \varphi_2 = 1,1\pi$ , где  $\varphi_0$  — угол, определяющий положение контейнера в начальный момент времени  $t_0$ ;  $\varphi_2$  — угол, определяющий положение контейнера в момент времени  $t_2$ .

Систему двух интегральных уравнений (6) решают путем замены интегралов интегральной суммой по сетке ( $t_i$ ),  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ , где  $n$  — количество ячеек в сетке в интервале времени от  $t_0$  до  $t_2$  [9]. Система уравнений (6) показывает,

что наиболее рациональны с позиции кинематики и динамики движения по спирали с постоянной поступательной скоростью соотношения:  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ ,  $M_0 = 2M_{тр}^0$  [10]. Для достижения максимального момента  $M_0$  при заданном давлении сжатого воздуха  $P_0$  необходимо использовать меридиональные лопатки, выполненные по радиусу  $r$ , высотой  $h_n = 2r$  [11].

Плавное вращение контейнеров достигается при выполнении соотношений

$$h_n = 2r = 2R_x \sin \varphi_t, \quad (7)$$

где  $R_x$  — радиус контейнера, м;  $\varphi_t$  — центральный угол сегмента дуги окружности радиусом  $r$ , по которому выполнены аэродинамические гребни.

При условии  $h_c = h_n$

$$M_0 = k_c(R_x + r)h_n b_c P_c, \quad (8)$$

где  $h_c$  и  $b_c$  — высота и ширина сопла, м;  $k_c$  — коэффициент преобразования полного давления сжатого воздуха в динамическое давление на аэродинамические лопатки контейнера;  $P_c$  — полное давление сжатого воздуха на выходе из сопла, Па.

На рис. 3 показана зависимость относительной длины участка разгрузки вращающегося контейнера  $\bar{L} = \frac{L_1}{L_0}$  от относительного момента давления сжатого  $\bar{M}_a = \frac{M_a}{M_0}$ .

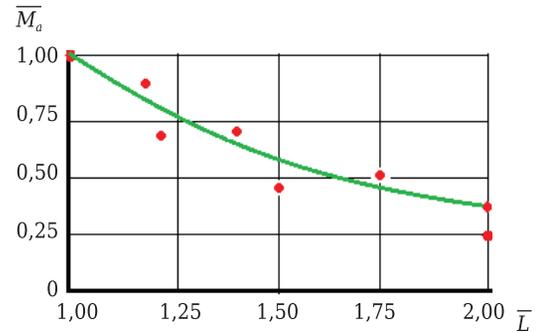


Рис. 3. График зависимости относительной длины  $\bar{L}$  участка разгрузки контейнеров от относительного момента  $\bar{M}_a$  аэродинамических сил

Видно, что по мере увеличения давления сжатого воздуха за счет аэродинамических сил, действующих на меридиональные лопатки, длина участка разгрузки контейнеров уменьшается по экспоненте.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система двух интегральных уравнений позволяет с достаточной точностью рассчитать требуемое давление сжатого воздуха, геометрические параметры аэродинамических гребней для заданной длины участка разгрузки вращающихся контейнеров и скорости их поступательного

движения, а наличие аэродинамических гребней — снизить потери энергии от трения при движении контейнеров по спирали.

**Библиографический список**

1. **Малевич, И. П.** Транспортировка и складирование порошкообразных строительных материалов / И. П. Малевич, В. С. Серяков, А. В. Мишин. — М. : Стройиздат, 1984. — 184 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Результаты обследования схемы пневмотранспорта известковой пыли, содержащей наночастицы, в ОАО «Серовский завод ферросплавов» / С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, В. С. Кийко, В. Н. Корюков // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 17–22.
3. **Давыдов, С. Я.** Проблемы использования пневмовинтовых насосов для перемещения насыпных грузов / С. Я. Давыдов, К. П. Косарев, Н. Г. Валиев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2013. — № 3. — С. 139–144.
4. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов. Исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
5. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство / С. Я. Давыдов, А. Н. Семин. — М. : Кадровый резерв, 2016. — 472 с.

6. **Давыдов, С. Я.** Межагрегатное перемещение сыпучих грузов в горячем состоянии / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, А. Е. Замураев, Е. В. Мастерова // Новые огнеупоры. — 2005. — № 8. — С. 16–19.
7. **Заявка 2020108092 Российская Федерация.** Разгрузочное устройство грузовых контейнеров трубопроводного транспорта / Давыдов С. Я., Кожушко Г. Г.; заявитель ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»; заявл. 25.02.2020.
8. **Давыдов, С. Я.** Экспериментальные исследования процесса разгрузки сыпучего материала из вращающегося контейнера контейнерного пневмотранспорта / С. Я. Давыдов, Г. Г. Кожушко, С. Н. Сычев // Новые огнеупоры. — 2011. — № 2. — С. 9–14.
9. **Смирнов, В. И.** Курс высшей математики. Т. 4. Ч. 1 / В. И. Смирнов. — М. : Наука, 1974. — 336 с.
10. **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа : уч. для вузов. — 7-е изд., испр. / Л. Г. Лойцянский. — М. : Дрофа, 2003. — 840 с.
11. **Макаров, В. Н.** Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции / В. Н. Макаров, Н. П. Косарев, Н. В. Макаров [и др.] // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2018. — Т. 18, № 2. — С. 178–189. ■

Получено 17.11.20

© С. Я. Давыдов, В. Н. Макаров, Н. В. Макаров, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**NN21 — 18-я Международная конференция по наноматериалам и нанотехнологиям**  
6–9 июля 2021 г., г. Салоники, Греция  
[www.nanotextology.com](http://www.nanotextology.com)



**The International Nanotech & Nanoscience Conference & Exhibition**  
**NANOTECH FRANCE 2021**  
23 - 25 June 2021 | Paris, France  
*Nanotechnology for a better world*

**NANOTECH FRANCE 2021 — Международная конференция и выставка по наноматериалам и нанотехнологиям**  
23–25 июня 2021 г. Париж, Франция  
[www.setcor.org](http://www.setcor.org)