

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-142-149>

УДК 628.4

Вакуумный пневмотранспорт для производственных и коммунально-бытовых компонентов

Канд. техн. наук А. Н. Пехота¹⁾,
акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Б. М. Хрусталеv²⁾,
докт. техн. наук В. Д. Акельев²⁾, магистрант А. А. Михальченко¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Образование коммунально-бытовых компонентов жизнедеятельности человека и производственных предприятий неизбежно, уровень их использования в Беларуси в среднем увеличился до 23 %. В статье дана оценка существующих систем сбора и удаления отработанных твердых бытовых элементов исходя из технологических этапов (подготовка компонентов к погрузке в мусороуборочный транспорт; организация их временного хранения в домовладениях, на предприятиях; сбор и вывоз с территорий домовладений, организаций и предприятий; обезвреживание, переработка, утилизация). Рассмотрены последствия несвоевременного сбора твердых бытовых и производственных отходов. Приведены факторы, оказывающие негативное влияние на среду обитания человека и экологию территорий населенных пунктов, предприятий. Представлен анализ эффективности своевременного удаления таких компонентов в системах коммунального хозяйства городов и предприятий как важной составляющей, обеспечивающей социальную, экономическую и экологическую значимость. На современном этапе развития техники и доступных технологий один из наиболее рациональных и экономически оправданных способов доставки отработанных элементов к участкам их сортировки и переработки – вакуумная транспортировка с помощью трубопроводного транспорта. Его применение обосновано в промышленных зонах, населенных пунктах с высокой и средней плотностью заселения, причем прокладывать такой трубопровод можно рядом с существующими трубопроводными и иными транспортными коммуникациями.

Ключевые слова: элементы, транспортировка, экология, технология, баланс, вакуум, плотность, параметры, утилизация

Для цитирования: Вакуумный пневмотранспорт при использовании производственных и коммунальных отходов / А. Н. Пехота [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 2. С. 142–149. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-142-149>

Vacuum Pneumatic Transport for Industrial and Utility Components

A. N. Pekhota¹⁾, B. M. Khroustalev²⁾, V. D. Akeliev²⁾, A. A. Mikhalchenko¹⁾

¹⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Waste generation in the life of people and enterprises is an inevitable process today. The level of utilization of municipal waste has increased on average to 23 % in Belarus. The paper provides an assessment of the existing

Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Khroustalev Boris M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-52
tg_v_fes@bntu.by

systems for the collection and disposal of waste solid household items based on technological stages (preparation of waste for loading into a garbage collection vehicle; organization of temporary storage of waste in households, at enterprises; collection and removal of waste from the territories of households, organizations and enterprises; neutralization, processing and recycling of waste). The consequences of untimely collection of solid household and industrial waste are considered in the paper. The paper presents the factors that have a harmful effect on the human environment and the ecology of the territories of settlements and enterprises. An analysis of the effectiveness of the timely removal of such components in the systems of municipal services of cities and enterprises as an important component providing social, economic and environmental significance is given in the paper. At the present stage of the development of technology and available technologies, one of the most rational and economically justified ways of delivering waste to the areas for their sorting and processing is vacuum transportation using pipeline transport. Its application is justified for industrial zones and settlements with high and medium population density. Moreover, such a pipeline can be laid next to existing pipeline and other transport communications.

Keywords: elements, transportation, ecology, technology, balance, vacuum, density, parameters, disposal

For citation: Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Akeliev V. D., Mikhailchenko A. A. (2021) Vacuum Pneumatic Transport for Industrial and Utility Components. *Science and Technique*. 20 (2), 142–149. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-142-149> (in Russian)

Введение

Особенностью процесса сбора отработанных коммунально-бытовых компонентов является то, что в работе транспортных средств значительное время (25–40 % и более) занимает продолжительность погрузо-разгрузочных операций, в связи с чем актуальными остаются проблемы безопасности их движения и экологической обстановки в различных районах, расхода топливно-энергетических ресурсов.

Один из способов решения перечисленных проблем – внедрение вакуумных систем с применением трубопроводного пневмотранспорта. Пневматический сбор и транспортировка вторичных компонентов реализуются во многих странах. Это эффективный метод транспортировки и обработки коммунально-бытовых отходов. Трубопроводы для их перемещения можно использовать независимо от расстояния. При этом автоматизированная система сбора и удаления компонентов обладает широким потенциалом технических возможностей для сбора и перемещения компонентов различных фракций [1].

Среди проблем в системах сбора компонентов можно выделить:

- антисанитарное состояние территории (особенно в теплое время года);
- наличие диффузионных потоков от транспортных объектов до пунктов приема (сортировки);
- выделение вредных веществ в окружающую среду при движении мусоровозов от мест их сбора до пункта приема (сортировки).

Основная часть

Пневматические системы транспортирования многообразных компонентов с использованием трубопроводов могут способствовать решению перечисленных задач. Для их функционирования необходимо создать групповые системы сортировки, представленные в виде технических элементов:

- селитебные территории, группы населенных территорий с крупными сооружениями для сортировки многофазных материалов к месту переработки;

- районы с установками малой производительности для сортировки и подготовки к доставке к узлам переработки отходов;

- группы объектов, коммунальных сооружений, производственных предприятий с элементами для сортировки и подготовки к доставке к участкам реабилитации вторичных компонентов;

- группы объектов, коммунальных сооружений, производственных предприятий с установками для транспортировки специальных видов отходов.

Технология вакуумной транспортировки отходов появилась еще в середине прошлого века и используется для транспортирования различных, в первую очередь сыпучих, материалов. Ее применение обосновано для промышленных зон, населенных пунктов с высокой и средней плотностью заселения, поскольку у пневматической установки закрытая система трубопроводов. Кроме того, есть и такие преимущества, как, например, отсутствие запахов, поступаю-

щих из нее в атмосферу. Благодаря постоянно поддерживаемому отрицательному давлению в системе не возникают утечки жидких компонентов. Высокая скорость (3,5–5,0 м/с) транспортирования смеси «твердые частицы – воздух – жидкость» в трубах предотвращает образование отложений [2]. Внедрение этой технологии в масштабах Республики Беларусь несложно осуществить, учитывая наличие пластиковых трубопроводов, производимых белорусскими предприятиями, а также промышленных вакуумных установок компаний Roediger, Airvac, ISEKI и их российских аналогов.

Пневматические системы транспортировки компонентов к участкам сортировки и переработки наиболее рациональны и экономически оправданы. Технологическую схему работы установки отходоотведения можно представить следующим образом. На поверхности в участках сбора коммунальных компонентов устанавливаются приемные контейнеры, возвышающиеся над землей на высоту до 1 м. Приемная часть маркируется расцветками с дополнительным размещением надписей, символов (рис. 1).

Система может функционировать следующим образом. На участке сбора расположены три люка – для сбора бумаги, картона и смешанных компонентов. Жители опускают туда

рассортированные коммунально-бытовые отходы в полиэтиленовых или бумажных пакетах объемом до 30 л. Опыт эксплуатации показывает, что наилучшее качество транспортировки – при заполнении пакета на 2/3. Под контейнерами располагается сеть подземных трубопроводов, оборудованная централизованной управляемой системой клапанов с автоматизированным открытием.

Работа системы осуществляется по определенным алгоритмам – согласно времени, степени наполнения и др. При открытии клапанов посредством поступления в магистраль воздушной фазы за счет работающей вакуумной установки в магистрали создается разрежение, и компоненты поступают в основной трубопровод, а затем – к участкам сбора, переработки, складирования. Отходы, доставленные к месту их сбора, сортируются и поступают либо непосредственно на переработку, либо на оборудование, обеспечивающее их уплотнение, для осуществления дальнейшего перемещения с применением наземных видов транспорта. По мере накопления они транспортируются на специализированные перерабатывающие предприятия [3]. На рис. 2 представлена упрощенная схема транспортировки компонентов из жилого микрорайона к месту их переработки.

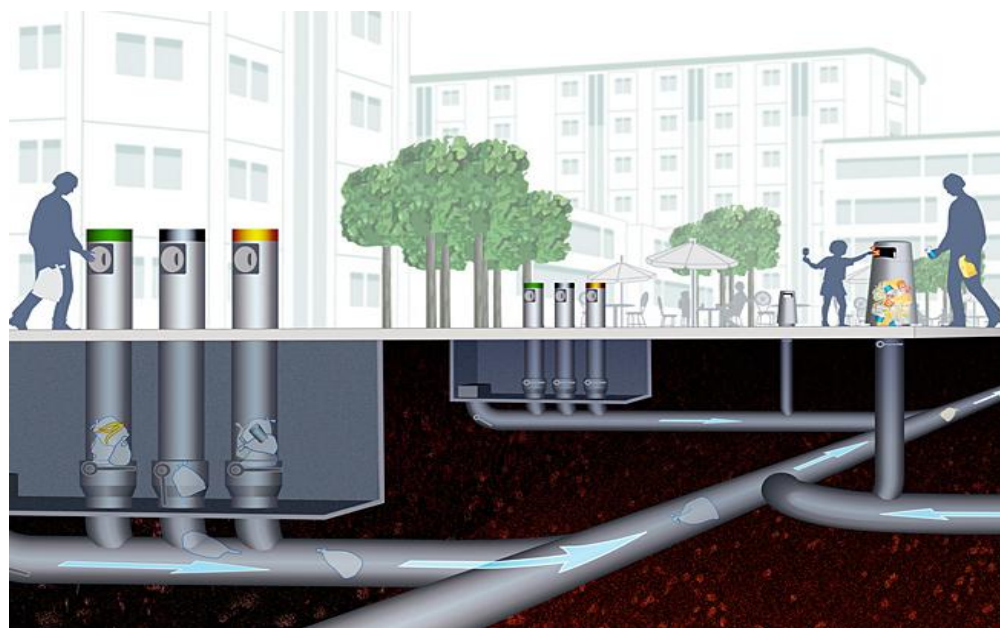


Рис. 1. Схема пневматической системы транспортировки неоднородных элементов в городском районе

Fig. 1. Diagram of pneumatic system for transporting heterogeneous elements in urban area

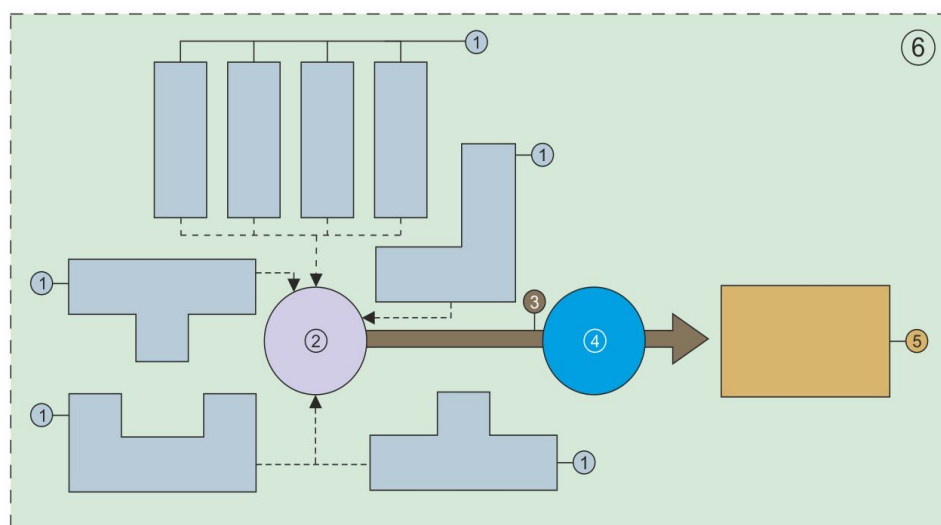


Рис. 2. Схема транспортировки компонентов из жилого микрорайона к месту их переработки:
 1 – здания и сооружения микрорайона города; 2 – место сбора отходов; 3 – пневматический трубопровод;
 4 – место приема отходов, подготовка материала (сырья, отходов) к многокомпонентному брикетированию;
 5 – цех переработки отходов (дробление, измельчение) и изготовления брикетов; 6 – микрорайон города

Fig. 2. Schematic diagram of component transportation from residential area to the place of their processing:
 1 – buildings and structures of city micro-district; 2 – waste collection point; 3 – pneumatic pipeline;
 4 – waste collection point, preparation of material (raw materials, waste) for multicomponent briquetting;
 5 – waste processing shop (crushing, grinding) and production of briquettes; 6 – micro-district of the city

В период эксплуатации протяженность сети транспортных трубопроводов может значительно увеличиться за счет подключения новых объектов. При этом также изменяется масса транспортируемых отходов, что, конечно, вызовет определенную нагрузку на работающую вакуумную установку. С целью бесперебойной работы системы на определенных участках существует сверхвысокое техническое разрежение. Ступенчатое разрежение можно создавать за счет включения в систему резервного вакуумного насоса, автоматически подключаемого в последовательную схему работы двух насосов. Один из них создает форвакуум (предварительное разрежение), а второй – из низкого более высокий вакуум. Минимальное давление, которого можно достичь с помощью современных вакуумных установок, достигает 10^{-16} мм рт. ст. Таким образом, применение комбинированных систем создания различных уровней разрежения позволяет транспортировать компоненты в широком диапазоне морфологического состава, разной плотности и с наличием жидких фаз.

На промышленных предприятиях всевозможных компонентов образуется достаточно много. Например, в ОАО «Белшина» их только

в одном цеху может быть до 23 видов. Они складываются и накапливаются в отдельных контейнерах, где находятся до соответствующих технологических операций. Чаще всего при вывозе с территории предприятия отходов мусоровозами невозможно укомплектовать их только однородными компонентами. Поэтому они сгружаются совместно, что в дальнейшем увеличивает объем работ по их сортировке для применения в доступных технологиях переработки. При трубопроводной транспортировке компонентов, как правило, исключается возможность их смешивания или засорения ими трубопровода. Отходы транспортируются к местам утилизации или вторичной обработки по мере их накопления в соответствии с принятым алгоритмом.

Упрощенная схема утилизации различных видов отходов промышленного предприятия представлена на рис. 3 [4–9]. Данная система позволяет с наименьшими затратами транспортировать компоненты к участкам их переработки, что актуально при создании производств по переработке смесей, например в многокомпонентное твердое топливо (RDF- и MSF-топливо). Эта система уже получила широкое распространение благодаря ряду преимуществ.

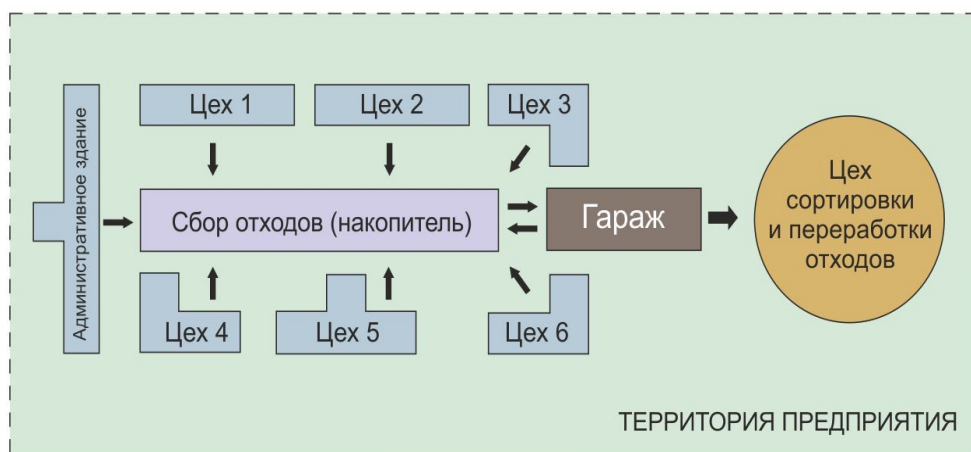


Рис. 3. Схема утилизации различных видов отходов промышленного предприятия

Fig. 3. Schematic diagram for disposal of various types of industrial waste

Сдерживающим фактором широкого распространения такой системы является отсутствие теоретически обоснованного алгоритма расчета. Недостаток существующей теоретической базы обусловил тот факт, что для определения диаметра труб вакуумной сети служат фиксированные решения в таблицах с ориентировочными значениями [10]. Сложность создания расчетных формул заключается в особенностях транспортирования отходов под действием вакуума, а именно – транспортировки многофазной среды «жидкость – воздух – твердые частицы» в трубопроводах с уклоном к горизонту. Пренебрегать расчетами, учитывающими поправки к характеристикам в зависимости от изменения уклона, нельзя, так как уклон неизбежно образуется при строительно-монтажных работах на застроенных территориях и прокладке трубопроводных вакуумных систем вблизи существующих инженерных коммуникаций. Однако на примере математического описания движения водовоздушной смеси [11–13] можно создать алгоритм расчета вакуумной трубопроводной системы транспортировки компонентов, учитывая верифицированную теоретическую базу расчета пневматического движения твердых фракций частиц, применяемых в системах трубопроводного транспорта сыпучих материалов.

Исследование и его результаты

С целью решения задачи создания и применения на практике алгоритма расчета вакуумных систем транспортировки отходов, а также

сравнения полученных результатов с уже имеющимися проведен ряд исследований с использованием экспериментальной установки, обеспечивающей транспортировку отходов под вакуумметрическим давлением в трубопроводах наружной канализации (диаметр 110 мм, толщина 3,2 мм, вакуумметрическое давление 20–40 кПа) производства УП «СТС-Беллопластик» НПВХ SN4. В результате исследований определено, что максимальная скорость транспортирования отходов v_s достигается при объемном расходе воздуха $\varepsilon = 0,71–0,74$, при котором соотношение «твердые частицы – воздух – жидкость» $Q_G/Q_L = 0,3–0,4$ [13].

На плотность смеси отходов также влияет распределение фаз по длине трубопровода, что, в свою очередь, зависит от структуры потока. Для определения режима движения газожидкостной смеси под действием вакуума выполнен ряд экспериментов на лабораторной установке. Определено, что режим движения в системе изменяется по длине трубопровода, что, скорее всего, связано с особенностью устройства системы вакуумной транспортировки отходов. Поэтому расчет системы необходимо выполнять для каждого участка, на котором происходит изменение структуры движения.

Общие потери давления в системе Δp определяются для каждого участка отдельно с учетом гидропневматических параметров, влияющих на величину градиента давления именно на нем в зависимости от длины участка l [13]

$$\Delta p = \int_0^l \left(\frac{dp}{dx} \right) dx = \left(\frac{dp}{dx} \right)_{1-2} l_{1-2} + \left(\frac{dp}{dx} \right)_{2-3} l_{2-3} + \left(\frac{dp}{dx} \right)_{3-4} l_{3-4} + \left(\frac{dp}{dx} \right)_{4-5} l_{4-5}. \quad (1)$$

При анализе результатов экспериментальных исследований с использованием теории подобия известны соотношения отдельных геометрических и технологических параметров функционирования реальных, экспериментальных вакуумных систем. В общем виде зависимость потерь давления в системе при вакуумном транспортировании можно представить следующим образом:

$$\Delta p = f(\rho_s, v_s, d, l, \mu_s), \quad (2)$$

где Δp – потеря давления, Па; ρ_s – плотность компонентов, кг/м³; v_s – скорость транспортирования смеси коммунальных компонентов, м/с; d – диаметр канала, м; l – длина коммуникаций, м; μ_s – коэффициент динамической вязкости системы, Па·с.

При решении системы уравнений, составленной с использованием матрицы степени размерности величин представленной зависимости, получен критерий подобия, включающий аэро- и гидродинамические, а также геометрические параметры движения компонентов в цилиндрических коммуникациях

$$\Pi_1 = \frac{\Delta p d}{v_s^2 \rho_s l}. \quad (3)$$

Аэродинамический расчет системы должен быть представлен таким образом, чтобы в то время, когда в ней отсутствует транспортировка, обеспечивался минимальный уровень вакуума, а время на его восстановление в системе не превышало требуемого значения. При нахождении диаметра не следует увеличивать скорость потока более чем на 5 м/с, поскольку это значение оптимальное для его функционирования, а большая скорость вызывает избыточное трение и потери при ускорении. Установлено, что:

– увеличение соотношения воздуха в системе «твердые частицы – воздух – жидкость» с использованием вакуумного воздуховпускного клапана, интегрированного в систему автоматического поддержания давления и загрузки,

может повысить производительность вакуумной системы;

– благодаря увеличению притока воздуха в систему подается больше энергии, что позволяет повысить скорость движения смеси, но это неприемлемо для некоторых видов производственных отходов и многокомпонентных смесей, поскольку приводит к снижению скорости и производительности вследствие увеличения потерь давления на трение и адгезию. Поэтому в аэро- и гидродинамических расчетах необходимо учитывать как статические, так и динамические факторы трубопроводной системы.

Основным параметром, характеризующим эффективную работу системы и выбор оборудования при транспортировании, является величина создаваемого в трубопроводной сети вакуума, который зависит от аэро- и гидродинамических потерь энергии на трение и местные сопротивления на участках трубопровода. Это значит, что расчет системы в первую очередь должен быть направлен на учет всех потерь энергии в системе, в результате чего можно определить расчетную величину вакуумметрического давления. При расчете технологических многокомпонентных систем для транспортировки многофазных смесей необходимо корректно определить их плотность. Отдельно с помощью (1) следует вычислить потери давления на участке Δp . Алгоритм расчета вакуумных систем показан на рис. 4.

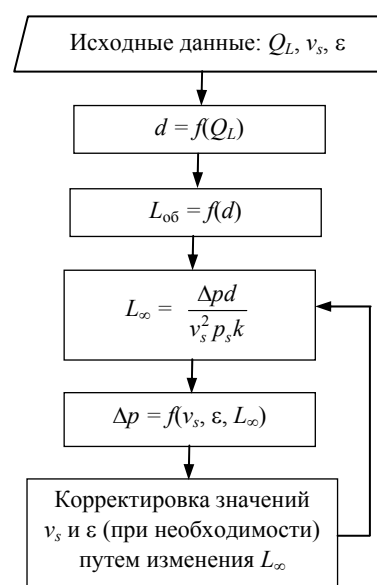


Рис. 4. Алгоритм расчета вакуумных систем
Fig. 4. Algorithm for vacuum systems calculating

Представленный метод расчета систем вакуумного транспортирования позволит подобрать диаметр трубопровода, определить объем транспортирования твердых бытовых отходов (ТБО) и воздуха, вакуумметрическое давление, необходимое для транспортировки отходов, длины расчетных участков, вычислить скорость воздушной смеси на расчетном участке вакуумной системы. Согласно полученным данным, при одинаковых диаметрах трубопровода с увеличением длины расчетного участка потери давления возрастают. Из этого можно сделать вывод, что для соблюдения заданных параметров работы системы вакуумного транспортирования ТБО (скорость транспортировки отходов, воздухо содержание, потери давления) при подобранном диаметре трубопровода главный регулируемый фактор – длина расчетного участка.

Средняя плотность транспортируемых компонентов

$$\bar{\rho}_s = \frac{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 + \dots + \rho_i}{x_1 + x_2 + \dots + x_i}, \quad (4)$$

где $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i$ – плотность $1^{20}, 2^{20}, \dots, i^{20}$ компонентов, кг/м³ (неорганических, полимерных, древесных, стеклянных); $\rho_1 = \frac{m_1}{V_1}$; $\rho_2 = \frac{m_2}{V_2}$;

$\rho_i = \frac{m_i}{V_i}$; m_1, m_2, \dots, m_i – масса $1^{20}, 2^{20}, \dots, i^{20}$ компонентов, кг; V_1, V_2, \dots, V_i – объем $1^{20}, 2^{20}, \dots, i^{20}$ компонентов, м³.

Линейную плотность теплопередачи q_e от транспортируемых компонентов в однослойной цилиндрической коммуникации к атмосферному воздуху в зимний и переходные периоды года, к пограничному воздушному слою у внешней поверхности трубопровода при стационарных теплоаэродинамических расчетах можно найти из уравнения

$$q_e = \frac{\pi(\bar{t}_{\infty,1} - \bar{t}_{\infty,2})}{\frac{1}{\bar{\alpha}_{0,1} d_{0,1}} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\bar{\alpha}_{0,2} d_{0,2}}}, \quad (5)$$

где $\bar{t}_{\infty,1}$ – средняя температура воздуха внутри цилиндрической коммуникации, °C; $\bar{t}_{\infty,2}$ – средняя температура наружного воздуха, °C;

$\bar{\alpha}_{0,1}, \bar{\alpha}_{0,2}$ – средний коэффициент теплоотдачи у внутренней и внешней поверхностей цилиндрической коммуникации, Вт/(м²·К); d_1, d_2 – внутренний и внешний диаметры цилиндрической коммуникации, м; λ – коэффициент теплопроводности цилиндрической стенки трубопровода, Вт/(м·К).

ВЫВОДЫ

1. Введение при строительстве и модернизации предприятий современной технологической системы сбора и транспортировки отходов позволит в два и более раз сократить расстояние их транспортирования по сравнению с вывозом автотранспортом. Дополнительно снижается транспортная нагрузка дорог общего пользования и обеспечивается безопасность дорожного движения.

2. Работа вакуумной установки обеспечивается электроэнергией, использование которой сегодня – приоритетная задача. Постепенный отказ от мусоровозов при увеличении уровня использования трубопроводного способа сбора отработанных коммунально-бытовых компонентов сократит расходы на топливо для предприятий. А это в свою очередь улучшит состояние окружающей среды городов и промышленных зон.

3. Установки вакуумной транспортировки отходов компактны, просты в наладке, легко вписываются в архитектурно-строительный ландшафт и технологический процесс предприятия, соответствуют высоким санитарно-гигиеническим требованиям по условиям перемещения отходов, могут быть полностью автоматизированы. К достоинствам установок также можно отнести возможность совмещения процесса транспортирования отдельных отходов или их смеси с различными массообменными и технологическими операциями, например с сушкой и охлаждением отдельных компонентов, разломом и сепарацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mohany, A. A Review of Pipeline Monitoring and Periodic Inspection Methods / A. Mohany, K. Sachedina // Pipeline Science and Technology. 2018. Vol. 2, No 3. P. 187–201.

2. Pavlou, D. G. Design Aspects for Connections, Supports, and Expansion Loops in Pipelines Made from Composite Materials / D. G. Pavlou // *Pipeline Science and Technology*. 2018. Vol. 2, No 2. P. 147–158.
 3. Бельдеева, Л. Н. Экологически безопасное обращение с отходами / Л. Н. Бельдеева, Ю. С. Лазуткина, Л. Ф. Комарова. Барнаул: Азбука, 2006. 179 с.
 4. Дабаева, М. Д. Эколого-безопасная утилизация отходов / М. Д. Дабаева, И. И. Федоров, А. И. Куликов. Улан-Удэ: Изд-во БГСХА, 2001. 94 с.
 5. Пульповая переработка пищевых отходов / А. М. Гонопольский [и др.]. М.: Изд-во «Перо», 2016. 126 с.
 6. Утилизация отходов производства и потребления / Э. М. Соколов [и др.]. Ярославль: ЯГТУ, 2006. 388 с.
 7. Трофименко, Ю. В. Модель управления транспортирования ТБО / Ю. В. Трофименко, С. Н. Просов, В. И. Комков // *ЭкоReal*. 2007. № 2. С. 25–32.
 8. Утилизация отходов в Круунувуоренранта [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.metrotaifun.com/automatic_solid_waste_collection_system/ru/. Дата доступа: 03.10.2020.
 9. Цыганков, А. П. Утилизация твердых отходов / А. П. Цыганков. М.: Стройиздат, 1985. 336 с.
 10. Экологически безопасные методы использования отходов / Р. П. Воробьева [и др.]; под общ. ред. Г. Е. Мерзлой, Р. П. Воробьевой; Департамент мелиор. земель и сельскохоз. водоснаб., НИИ по сельскохоз. использ. сточных вод (НИИССВ) «Прогресс», Алт. фил. НИИССВ «Прогресс» и др. Барнаул: Изд-во АГУ, 2000. 554 с.
 11. Raclavský, J. Problematika Navrhování Venkovních Podtlakových Systémů Stokových Sítí / J. Raclavský. Brno: VITIUM, 2011. P. 35.
 12. Хрусталева, Б. М. Пневматический транспорт / Б. М. Хрусталева, Н. В. Кислов. Минск: ООО «Информационная служба недвижимости», 1998. 452 с.
 13. Математическое описание газожидкостной структуры потока в системе транспортирования жидкости под вакуумом / В. И. Нездойминов [и др.] // *Motrol. Commission of Motorization and Energeticsin Agriculture*. Lublin. 2013. Vol. 15, No 6. P. 125–132.
- Поступила 24.12.2020
Подписана в печать 25.02.2021
Опубликована онлайн 30.03.2021

REFERENCES

1. Mohany A., Sachedina K. (2018) A Review of Pipeline Monitoring and Periodic Inspection Methods. *Pipeline*

Received: 24.12.2020
Accepted: 25.02.2021
Published online: 30.03.2021