

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕНА ТРУБОПРОВОДА В СИСТЕМАХ ПНЕВМОТРАНСПОРТА ПОЛИЭТИЛЕНА

А.А. Очков

aochkov@bmstu.ru

В.М. Скорняков

skornyakov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В настоящее время системы пневмотранспорта полиэтилена широко распространены в химической промышленности в силу многих преимуществ. Недостатком подобных систем является образование полиэтиленовых лент в процессе транспортирования, преимущественно в коленах трубопровода. Разработана математическая модель процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода, приведены условия их образования и введены принятые допущения. С использованием полученных расчетных зависимостей разработан алгоритм расчета оптимальных геометрических параметров колена трубопровода (выбранный критерий оптимальности — минимальное образование полиэтиленовых лент в системе пневмотранспорта). Описаны управляющие параметры, приведена целевая функция и обоснован ее выбор. Разработан алгоритм расчета параметров колена трубопровода по выбранному критерию. Приведены результаты расчета оптимальных геометрических параметров колена трубопровода по выбранному критерию оптимальности. Отмечено, что полученная конструкция максимально близка к существующим, применяемым в подобных системах, направленным на уменьшение образования полиэтиленовых лент в системах пневмотранспорта. Оценены перспективы дальнейшего развития сформулированной научной проблемы

Ключевые слова

Пневмотранспорт, полиэтилен, двухфазный поток, математическое моделирование, колено трубопровода

Поступила 24.10.2024

Принята 07.11.2024

© Автор(ы), 2024

Введение. В современных системах пневмотранспорта полиэтилена важную роль играет оптимизация геометрических параметров различных элементов, особенно колена трубопровода. Пневмотранспорт является одним

из эффективных методов перемещения сыпучих материалов, в том числе и гранул полиэтилена, широко используемого в различных отраслях промышленности вследствие уникальных свойств. Однако процесс транспортирования сыпучих материалов через трубопроводы сопряжен с некоторыми техническими и экономическими вызовами, например, с потерей давления, износом оборудования и материала, уменьшением эффективности [1–3].

Согласно результатам анализа научных работ, колена трубопроводов в системах пневмотранспорта полиэтилена представляют собой критические участки [4–10], где образуется наибольшее число полиэтиленовых лент [11–16]. В связи с этим оптимизация конструктивных характеристик колен трубопровода — это задача, требующая комплексного подхода, включающего в себя анализ геометрии и динамики потока, а также материально-технические аспекты [17–20].

Цель настоящей работы — выработать рекомендации по проектированию колен трубопроводов для уменьшения образования полиэтиленовых лент в системах пневмотранспорта. Рассмотрен процесс образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода, приведен алгоритм расчета оптимальных геометрических параметров колен трубопроводов в системах пневмотранспорта полиэтилена.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью оптимизации процессов в условиях растущих требований к производственным стандартам и экологии, что делает результаты исследования важным вкладом в развитие пневмотранспорта сыпучих материалов и инженерии в целом.

Математическая модель образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода. Образование полиэтиленовых лент происходит при условиях, когда температура полиэтилена близка к температуре его плавления; материал движется вдоль стенки [21].

Расчетная схема процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода (поворотном участке) приведена на рис. 1.

В рассматриваемой математической модели процесса образования лент из волокон материала в процессе перемещения в системе пневмотранспорта приняты следующие допущения:

- форма транспортируемой частицы волокон материала — сфера;
- скорость движения частиц в период между соударениями постоянная;
- взаимодействие частиц между собой абсолютно упругое;

- закон отражения при взаимодействии частиц со стенкой и между собой зеркальный;
- процесс образования ленты из волокон материала начинается при достижении частицей температуры, близкой к температуре ее плавления, и при движении частицы вдоль стенки (угол $\alpha = 0 \pm 2^\circ$ или $180 \pm 2^\circ$).

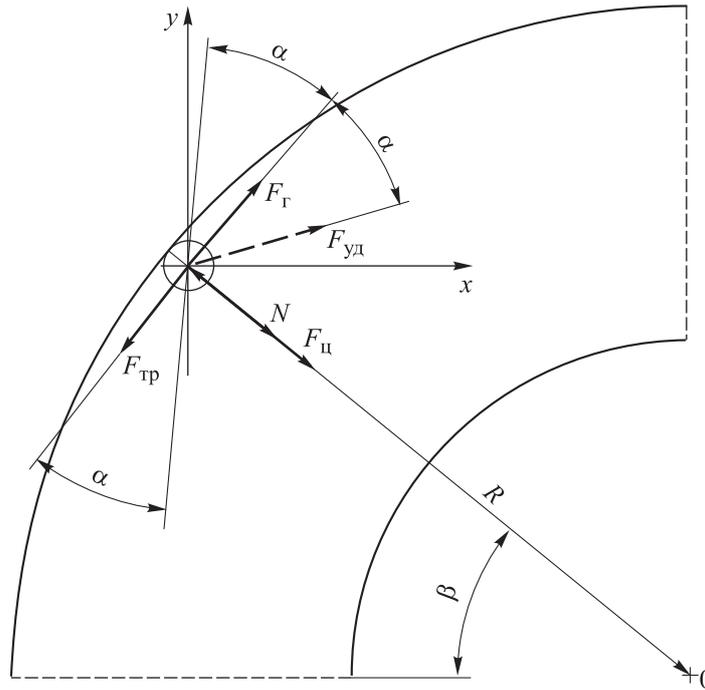


Рис. 1. Расчетная схема процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода (поворотном участке):

$F_{ц}$ — центробежная сила; N — реакция опоры; $F_{тр}$ — сила трения;
 F_r — сила, с которой газ действует на частицу; $F_{уд}$ — сила удара

Рассмотрим процесс соударения частицы со стенкой поворотного участка трубопровода. С учетом принятых допущений в момент соударения частицы со стенкой на нее действует равнодействующая внешних сил

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{F}_{ц} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_r + \vec{F}_{уд}, \tag{1}$$

где

$$\vec{F}_{ц} = \frac{m_q \vec{v}_q^2}{R}; \tag{2}$$

$$\vec{F}_{тр} = \mu \vec{N}; \tag{3}$$

$$\vec{F}_r = \frac{m_q \vec{v}_r}{t}. \tag{4}$$

Полагаем, что при ударе частицы о стенку нагрева частицы не происходит. Тогда частица нагревается только от трения при движении вдоль стенки трубопровода, т. е. работа силы трения равна количеству теплоты, выделившемуся в процессе трения: $Q = A_{\text{тр}}$. Для определения $A_{\text{тр}}$ выразим $F_{\text{тр}}$ из (1), после проецирования сил, действующих на частицу на осях x и y , получим

$$F_{\text{тр}} = \frac{a \operatorname{ctg} \beta + 2F_{\text{ц}} \sin \beta - F_{\text{г}} \sin(90 - \beta) - F_{\text{уд}} \sin(\alpha - 90 + \beta)}{1 / (\sin(90 - \beta)) + \operatorname{tg} \beta \cos(90 - \beta)}, \quad (5)$$

где $a = F_{\text{уд}} \cos(\alpha - 90 + \beta) + F_{\text{г}} \cos(90 - \beta)$. Тогда из системы уравнений можно найти изменение температуры частицы при ее движении вдоль стенки:

$$\begin{aligned} Q &= cm_{\text{ч}} \Delta T; \\ A_{\text{тр}} &= F_{\text{тр}} l_{\text{тр}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где c — удельная теплоемкость частицы; $l_{\text{тр}}$ — длина пути трения частицы.

Длина пути трения частицы также будет и длиной образованных волокон материала при достижении частицей материала температуры, близкой к температуре плавления.

Траектории дисперсных частиц определяют с помощью лагранжева подхода [22]:

$$\frac{dV_{\text{г}}}{dt} = K (V_0 - V_{\text{г}}). \quad (7)$$

Здесь K — коэффициент взаимодействия фаз при ламинарном движении.

Алгоритм расчета оптимальных параметров колена трубопровода.
Построение расчетной области. Геометрия колена трубопровода (поворотного участка) задается в полярной системе координат (r, θ) двумя криволинейными границами: внутренней и внешней стенками. Угол поворота колена составляет 90° , что соответствует изменению полярного угла θ от 0 до $\pi/2$ (рис. 2).

Внутренняя стенка колена описывается постоянным радиусом $r_{\text{min}}(\theta) = r_1$, где r_1 — радиус скругления внутренней стенки.

Внешняя стенка колена задается функциональной зависимостью

$$r_{\text{max}}(\theta) = r_{\text{min}}(\theta) + h(\theta) + d,$$

где θ — полярный угол; $h(\theta) = \theta(\theta - \pi/2)(c_1 + c_2\theta + c_3\theta^2)$ (c_1, c_2, c_3 — коэффициенты, определяющие форму внешней стенки). Уравнение

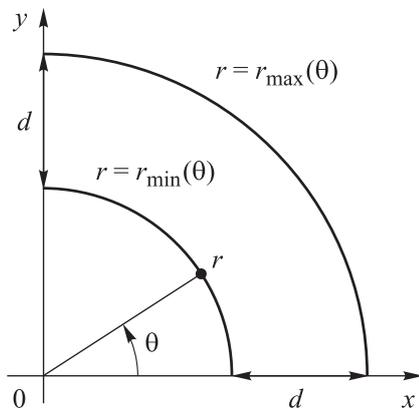


Рис. 2. Схема колена трубопровода (поворотного участка); d — диаметр трубопровода

внешней стенки определялось таким образом, чтобы при формировании геометрии колена трубопровода во всем диапазоне значений изменяемых параметров учитывалось свойство выпуклости колена во всем диапазоне координат, рассматриваемых при расчете.

Полиномиальный множитель $\theta(\theta - \pi/2)$ обеспечивает гладкое сопряжение без перегибов рассматриваемой кривой с прямолинейными участками трубопровода при $\theta = 0$ (вход) и $\theta = \pi/2$ (выход). Выбранная форма полиномиального множителя гарантирует нулевые значения дополнительного слагаемого в этих точках, что обеспечивает сохранение диаметра d в сечениях трубопровода на входе в колено и на выходе из него. Коэффициенты c_1, c_2, c_3 позволяют управлять формой внешней стенки между входным и выходным сечениями для достижения максимально разнообразных форм колена трубопровода.

На расчетную область накладывается квадратная сетка с шагом $\Delta x = d/10$. В области определена зона генерации частиц, представляющая собой прямоугольник шириной $20r$ и высотой $28r$. Новые частицы генерировались в этой зоне с частотой, зависящей от времени их пролета через зону генерации. Новые частицы появляются, когда предыдущие покидают зону.

Алгоритм оптимизации. Цель оптимизации — рассчитать геометрические параметры колена трубопровода (поворотного участка), при которых обеспечивается условие минимального образования полиэтиленовых лент. С учетом принятых допущений и основных зависимостей (1)–(7) математической модели образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода системы пневмотранспорта в качестве целевой функции выбрана функция δ , которая включает в себя зависимости распределения частиц по площади колена и число соударений частиц между собой и со стенками трубопровода.

Целевая функция имеет вид

$$\delta(\theta) = \frac{N_c(\theta)}{S(\theta)N_{\text{ч}}(\theta)} + \frac{C(\theta)}{S(\theta)N_{\text{ч}}(\theta)}, \quad (8)$$

где N_c — наибольшее число столкновений в ячейке; S — площадь расчетной области; $N_{\text{ч}}$ — общее число частиц; C — максимальное число частиц, прошедших через ячейку, сопряженную с верхней границей колена трубопровода.

В процессе оптимизации геометрических параметров колена трубопровода на геометрию расчетной области, исходя из существующих рекомендаций [21, 23, 24], наложены следующие ограничения:

$$h(\theta, c_1, c_2, c_3) \leq \frac{9d}{10}$$

— сверху;

$$h(\theta, c_1, c_2, c_3) \geq -\frac{d}{2}$$

— снизу;

$$\left(\frac{7d}{2} + h(\theta, c_1, c_2, c_3) \right) \cos \theta \leq \frac{7d}{2} + \frac{16d}{100}$$

— на координате x .

Для поиска оптимальных геометрических параметров колена трубопровода (коэффициентов c_1, c_2, c_3) применяется алгоритм перебора с использованием квазислучайной последовательности R_d , которая создает равномерно распределенные точки в пределах заданных границ [25]. Для каждого набора параметров проводится симуляция $n = 15$ раз и значения δ усредняются для оценки качества параметров. Лучшие результаты по выбранному критерию — минимальное образование полиэтиленовых лент в системе пневмотранспорта — сохраняются и используются для дальнейшего анализа.

Расчет оптимальных параметров колена трубопровода. Заданы следующие исходные данные: диаметр трубопровода $d = 80$ мм; радиус частицы $r_{\text{ч}} = 1,5$ мм; шаг по времени $\tau = 0,001$ с; число шагов $n = 1001$; начальная скорость частиц $V_{\text{ч}} = 1000$ мм/с; скорость газа $v_{\text{г}} = 1000$ мм/с.

При моделировании гранулы полиэтилена приняты за частицы окружностью с радиусом r . Направление вектора начальной скорости частиц задано по нормальному закону распределения с параметрами

$\mu = \pi / 2$ (математическое ожидание) и $\sigma = \pi / 8$ (среднеквадратическое отклонение). Для предотвращения случая, когда вектор скорости частицы будет направлен обратно потоку, задано ограничение по направлению вектора от 0 до π . Модуль вектора скорости частицы $V_0 = 1$ м/с.

В расчетной области задано поле скоростей газа, направленное вдоль колена трубопровода и равное по модулю $V_r = 1$ м/с (рис. 3). Схема алгоритма оптимизации геометрических параметров колена трубопровода приведена на рис. 4.

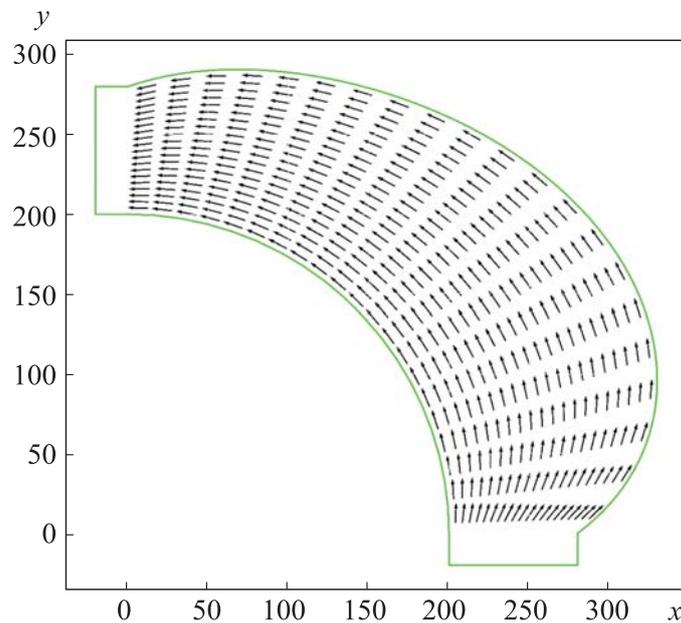


Рис. 3. Поле скоростей газа в колене трубопровода

В процессе оптимизации геометрических параметров колена трубопровода по выбранному критерию осуществлялся непрерывный расчет параметра оптимизации C в ячейках в области, прилегающей к верхней стенке колена, но не пересекающей его, и подсчет числа частиц, пройденных через ячейки. В результате расчета выбирали ту ячейку, через которую прошло наибольшее число частиц за весь процесс (рис. 5).

Для определения параметра оптимизации N_c рассчитывалась ячейка, сопряженная с контуром, в области которой произошло наибольшее число столкновений со стенкой.

В течение цикла оптимизации проведено 1 799 953 итераций расчета. Оптимизированные значения коэффициентов внешней стенки (10 вариантов) с наименьшим значением δ приведены в таблице.

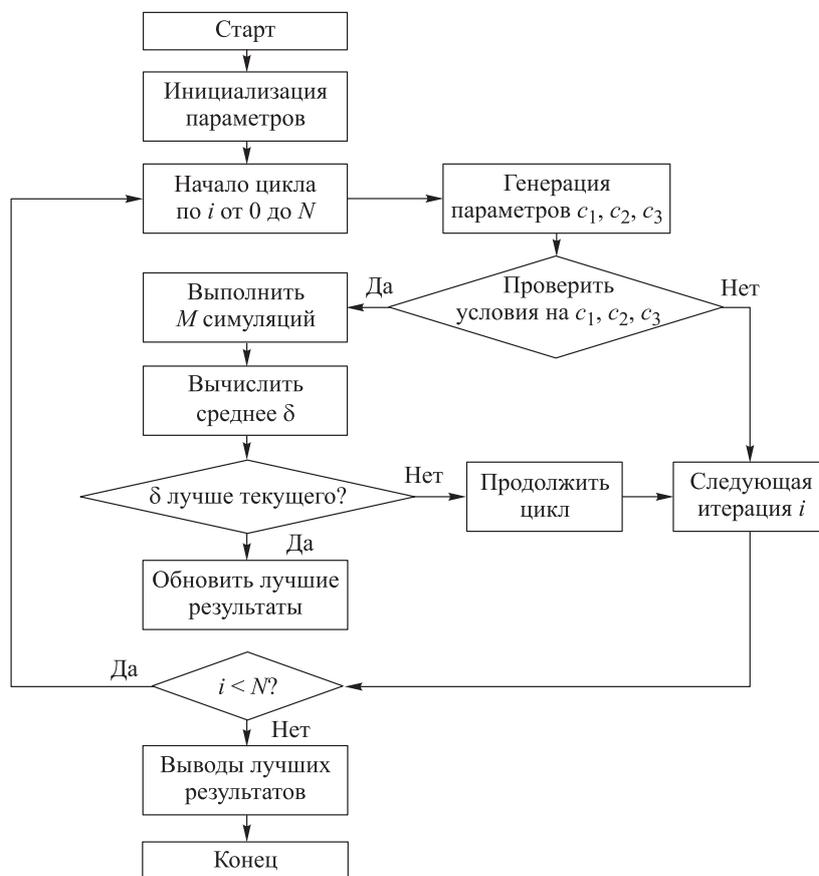


Рис. 4. Схема алгоритма оптимизации

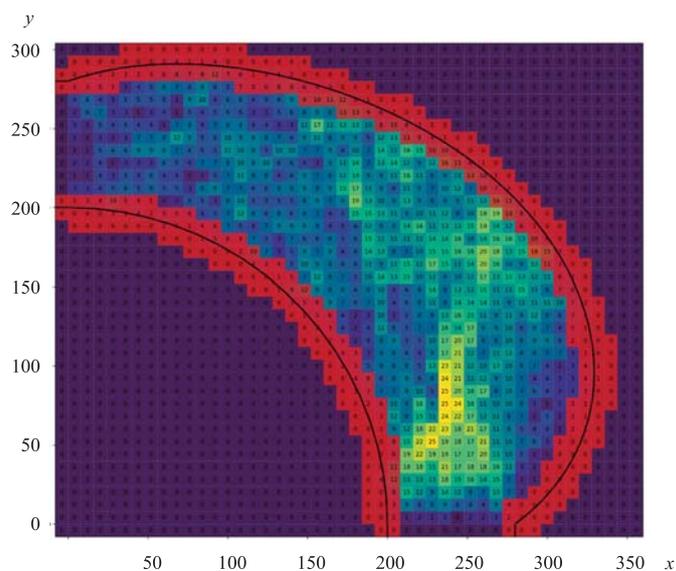


Рис. 5. Распределение частиц за все время процесса

Оптимизированные значения коэффициентов внешней стенки (10 вариантов)

Вариант	c_1	c_2	c_3	$\delta \cdot 10^6$
1	-63,61	33,39	-92,17	7,44
2	-71,50	75,96	-120,56	7,44
3	-79,39	118,52	-148,95	7,54
4	-52,04	-47,77	-16,85	7,59
5	-48,32	12,19	-80,01	7,68
6	-63,26	-0,17	-59,68	7,68
7	-40,07	-63,94	-19,13	7,69
8	-44,24	38,59	-110,68	7,77
9	-32,60	-57,76	-29,29	7,87
10	-24,72	-100,32	-0,90	7,89

Выводы. Разработана математическая модель рабочего процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода (поворотном участке) системы пневмотранспорта полиэтилена. Предложен алгоритм расчета оптимальных геометрических параметров колена трубопровода. Выбран критерий оптимальности — минимальное образование полиэтиленовых лент в системе пневмотранспорта. С учетом разработанной программы расчета [26] проведена оптимизация геометрических параметров колена трубопровода по выбранному критерию оптимальности, даны практические рекомендации. Следует отметить, что полученные геометрические параметры максимально близки к существующим решениям по уменьшению образования полиэтиленовых лент [1, 24], что указывает на относительно высокую точность предложенного алгоритма расчета. На следующем этапе планируется проведение эксперимента, что позволит выполнить более детальную верификацию разработанной математической модели процесса образования полиэтиленовых лент и предложенного алгоритма расчета оптимальных геометрических параметров поворотного колена трубопровода в системах пневмотранспорта полиэтилена.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mills D. Pneumatic conveying design guide. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2004.
- [2] Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. М., Химия, 1972.
- [3] Левич В.Г., Мясников В.П. Кинетическая теория псевдооживленного состояния. *Химическая промышленность*, 1966, № 6, с. 404–408.

- [4] Ibrokhimov A., Orzimatov J., Usmonov M., et al. Mathematical modeling of particle movement in laminar flow in a pipe. *BIO Web Conf.*, 2023, vol. 84, art. 02026. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248402026>
- [5] Pan R., Wypych P.W. Pressure drop and slug velocity in low-velocity pneumatic conveying of bulk solids. *Powder Technol.*, 1997, vol. 94, no. 2, pp. 123–132. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(97\)03290-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(97)03290-7)
- [6] Mason D.J., Levy A. A model for non-suspension gas-solids flow of fine powders in pipes. *Int. J. Multiph. Flow*, 2001, vol. 27, no. 3, pp. 415–435. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00033-1)
- [7] Hilton J.E., Cleary P.W. The influence of particle shape on flow modes in pneumatic conveying. *Chem. Eng. Sc.*, 2011, vol. 66, no. 3, pp. 231–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.09.034>
- [8] Lain S., Sommerfeld M. Numerical calculation of pneumatic conveying in horizontal channels and pipes: detailed analysis of conveying behavior. *Int. J. Multiph. Flow*, 2012, vol. 39, pp. 105–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.09.006>
- [9] Villermaux E. The formation of filamentary structures from molten silicates: Pele's hair, angel hair, and blown clinker. *CR Mecanique*, 2012, vol. 340, no. 8, pp. 555–564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.06.003>
- [10] Elghobashi S. On predicting particle-laden turbulent flows. *Appl. Sc. Res.*, 1994, vol. 52, no. 4, pp. 309–329. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00936835>
- [11] Elghobashi S.E., Abou-Arab T.W. A two-equation turbulence model for two-phase flows. *Phys. Fluids*, 1983, vol. 26, no. 4, pp. 931–938. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.864243>
- [12] Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. Boston, Academic Press, 1994.
- [13] Gidaspow D., Bezburuah R., Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds. Kinetic theory approach. *Proc. the 7th Int. Conf. on Fluidization*, 1992, pp. 75–82.
- [14] Syamlal M., Rogers W., O'Brien T.J. MFIIX documentation. Vol. 1: Theory guide. Springfield, Department of Energy, 1993.
- [15] Ma D., Ahmadi G. A thermodynamical formulation for dispersed multiphase turbulent flows-1, 2. *Int. J. Multiph. Flow*, 1990, vol. 16, no. 2, pp. 323–351. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(90\)90063-O](https://doi.org/10.1016/0301-9322(90)90063-O)
- [16] Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization. Boston, Academic Press, 1994.
- [17] Ogawa S., Umemura A., Oshima N. On the equation of fully fluidized granular materials. *ZAMP*, 1980, vol. 31, pp. 483–493. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01590859>
- [18] Wen C.-Y., Yu Y.H. Mechanics of fluidization. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 1966, vol. 62, pp. 100–111.
- [19] Lun C.K.K., Savage S.B., Jeffrey D.J., et al. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *J. Fluid Mech.*, 1984, vol. 140, pp. 223–256. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112084000586>

- [20] Tripathi N.M., Santo N., Kalman H., et al. Experimental analysis of particle velocity and acceleration in vertical dilute phase pneumatic conveying. *Powder Technol.*, 2018, vol. 330, pp. 239–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.017>
- [21] Lorenz R.D. A theory of angel hair: analytic prediction of frictional heating of particulates in pneumatic transport. *Powder Technol.*, 2019, vol. 355, no. 3, pp. 264–267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.057>
- [22] Han T., Levy A., Kalman H. DEM simulation for attrition of salt during dilute-phase pneumatic conveying. *Powder Technol.*, 2003, vol. 129, no. 1-3, pp. 92–100. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00252-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00252-8)
- [23] Hanley K.J., Byrne E.P., Cronin K. Probabilistic analysis of particle impact at a pipe bend in pneumatic conveying. *Powder Technol.*, 2013, vol. 233, pp. 176–185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.08.018>
- [24] Dhodapkar S., Solt P., Klinzing G. Understanding bends in pneumatic conveying systems. *Chemical Engineering*, 2009, vol. 116, no. 4, pp. 54–60.
- [25] Roberts M. The unreasonable effectiveness of quasirandom sequences. URL: <https://extremelearning.com.au/unreasonable-effectiveness-of-quasirandom-sequences> (дата обращения: 15.10.2024).
- [26] Скорняков В.М., Очков А.А., Хамади М.И. Программный модуль оптимизации геометрических параметров колена трубопровода систем пневмотранспорта полиэтилена. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ РФ 2024684324. Зарег. 16.10.2024.

Очков Андрей Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Скорняков Владимир Михайлович — лаборант учебного центра «Фотонная энергетика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Очков А.А., Скорняков В.М. Оптимизация геометрических параметров колена трубопровода в системах пневмотранспорта полиэтилена. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 4 (151), с. 82–95. EDN: WFXKYM

**OPTIMIZING GEOMETRIC PARAMETERS OF A PIPELINE ELBOW
IN THE PNEUMATIC POLYETHYLENE TRANSPORTATION SYSTEMS**

A.A. Ochkov

aochkov@bmstu.ru

V.M. Skornyakov

skornyakov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Currently, the pneumatic polyethylene transportation systems are widely used in the chemical industry due to their major advantages. However, one of the most significant disadvantages of such systems is formation of the polyethylene tapes during their transportation, usually in the pipeline elbows. The paper presents an obtained mathematical model depicting the process of the polyethylene tape formation in a pipeline elbow, introduces the accepted assumptions and provides for conditions in formatting the polyethylene tapes. Using the obtained computed dependencies makes it possible to develop an algorithm to identify the pipeline elbow optimal geometric parameters (minimal polyethylene tape formation is the selected optimality criterion). The paper describes the control parameters, provides for the target function and substantiates its selection. Based on the developed algorithm, the elbow optimal parameters are computed according to the selected criterion. Results of computing optimal geometric parameters of the pipeline elbow according to the optimality criterion Minimum polyethylene tapes formation in the pneumatic transportation system are presented. The paper notes that the resulting design is close as possible to the existing solutions used in similar systems and aimed at reducing the polyethylene tapes formation in the pneumatic transportation systems. It assesses the prospects in further development of the formulated scientific problem

Keywords

Pneumatic transportation, polyethylene, two-phase flow, mathematical simulation, pipeline elbow

Received 24.10.2024

Accepted 07.11.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Mills D. Pneumatic conveying design guide. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2004.
- [2] Razumov I.M. Psevdozhizhenie i pnevмотransпорт sypuchikh materialov [Pseudo-liquid and pneumatic transport of bulk materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1972.
- [3] Levich V.G., Myasnikov V.P. Kinetic theory of the pseudo-liquid state. *Khimicheskaya promyshlennost*, 1966, no. 6, pp. 404–408 (in Russ.).
- [4] Ibrokhimov A., Orzimatov J., Usmonov M., et al. Mathematical modeling of particle movement in laminar flow in a pipe. *BIO Web Conf.*, 2023, vol. 84, art. 02026. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248402026>
- [5] Pan R., Wypych P.W. Pressure drop and slug velocity in low-velocity pneumatic conveying of bulk solids. *Powder Technol.*, 1997, vol. 94, no. 2, pp. 123–132. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(97\)03290-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(97)03290-7)

- [6] Mason D.J., Levy A. A model for non-suspension gas-solids flow of fine powders in pipes. *Int. J. Multiph. Flow*, 2001, vol. 27, no. 3, pp. 415–435.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00033-1)
- [7] Hilton J.E., Cleary P.W. The influence of particle shape on flow modes in pneumatic conveying. *Chem. Eng. Sc.*, 2011, vol. 66, no. 3, pp. 231–240.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.09.034>
- [8] Lain S., Sommerfeld M. Numerical calculation of pneumatic conveying in horizontal channels and pipes: detailed analysis of conveying behavior. *Int. J. Multiph. Flow*, 2012, vol. 39, pp. 105–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.09.006>
- [9] Villiermaux E. The formation of filamentary structures from molten silicates: Pele's hair, angel hair, and blown clinker. *CR Mecanique*, 2012, vol. 340, no. 8, pp. 555–564.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.06.003>
- [10] Elghobashi S. On predicting particle-laden turbulent flows. *Appl. Sc. Res.*, 1994, vol. 52, no. 4, pp. 309–329. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00936835>
- [11] Elgobashi S.E., Abou-Arab T.W. A two-equation turbulence model for two-phase flows. *Phys. Fluids*, 1983, vol. 26, no. 4, pp. 931–938.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.864243>
- [12] Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. Boston, Academic Press, 1994.
- [13] Gidaspow D., Bezburuah R., Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds. Kinetic theory approach. *Proc. the 7th Int. Conf. on Fluidization*, 1992, pp. 75–82.
- [14] Syamlal M., Rogers W., O'Brien T.J. MFIx documentation. Vol. 1: Theory guide. Springfield, Department of Energy, 1993.
- [15] Ma D., Ahmadi G. A thermodynamical formulation for dispersed multiphase turbulent flows-1, 2. *Int. J. Multiph. Flow*, 1990, vol. 16, no. 2, pp. 323–351.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(90\)90063-O](https://doi.org/10.1016/0301-9322(90)90063-O)
- [16] Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization. Boston, Academic Press, 1994.
- [17] Ogawa S., Umemura A., Oshima N. On the equation of fully fluidized granular materials. *ZAMP*, 1980, vol. 31, pp. 483–493. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01590859>
- [18] Wen C.-Y., Yu Y.H. Mechanics of fluidization. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 1966, vol. 62, pp. 100–111.
- [19] Lun C.K.K., Savage S.B., Jeffrey D.J., et al. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *J. Fluid Mech.*, 1984, vol. 140, pp. 223–256. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112084000586>
- [20] Tripathi N.M., Santo N., Kalman H., et al. Experimental analysis of particle velocity and acceleration in vertical dilute phase pneumatic conveying. *Powder Technol.*, 2018, vol. 330, pp. 239–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.017>
- [21] Lorenz R.D. A theory of angel hair: analytic prediction of frictional heating of particulates in pneumatic transport. *Powder Technol.*, 2019, vol. 355, no. 3, pp. 264–267.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.057>

[22] Han T., Levy A., Kalman H. DEM simulation for attrition of salt during dilute-phase pneumatic conveying. *Powder Technol.*, 2003, vol. 129, no. 1-3, pp. 92–100.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00252-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00252-8)

[23] Hanley K.J., Byrne E.P., Cronin K. Probabilistic analysis of particle impact at a pipe bend in pneumatic conveying. *Powder Technol.*, 2013, vol. 233, pp. 176–185.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.08.018>

[24] Dhodapkar S., Solt P., Klinzing G. Understanding bends in pneumatic conveying systems. *Chemical Engineering*, 2009, vol. 116, no. 4, pp. 54–60.

[25] Roberts M. The unreasonable effectiveness of quasirandom sequences. Available at: <https://extremelearning.com.au/unreasonable-effectiveness-of-quasirandom-sequences>

(accessed: 15.10.2024).

[26] Skornyakov V.M., Ochkov A.A., Khamadi M.I. Software module for optimizing the geometric parameters of the pipeline elbow polyethylene pneumatic conveying systems. Software reg. cert. RU 2024684324. Reg. 16.10.2024 (in Russ.).

Ochkov A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vacuum and Compressor Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Skornyakov V.M. — Laboratory Assistant, Photon Energy Education Center, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ochkov A.A., Skornyakov V.M. Optimizing geometric parameters of a pipeline elbow in the pneumatic polyethylene transportation systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 4 (151), pp. 82–95 (in Russ.). EDN: WFXKYM