

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ ЗАКЛАДКЕ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Васильева М.А., Зеленцова А.А.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: гидросмесь, трубопроводный транспорт, дальность транспортирования, сужение труб, ядро потока, индекс структуры потока.

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная задача поддержания скорости потока закладочной гидросмеси выше критических значений, что способствует достижению условий стабильной и эффективной ее подачи на дальние расстояния. Для исследования потока выполнено 3D моделирование течения неньютоновской жидкости, позволившее оценить степень влияния поэтапного изменения (уменьшения) диаметра трубы на формирование ядра потока и выделить характерные зоны структуры потока, формируемых по длине рассматриваемых участков. Представлены отличительные особенности распределения полей скорости по сечению трубы при прохождении сужения, с целью сохранения однородности потока за счет поддержания кинетической энергии. Полученные результаты являются основой для обоснования выбора соотношений диаметров трубопроводной системы закладочного комплекса при перемещении гидросмесей с различными реологическими свойствами.

MODELING OF THE DISTRIBUTION OF VELOCITY FIELDS DURING FLOW MOVEMENT IN A PIPELINE OF VARIABLE CROSS-SECTION USED WHEN BACKFILLING MINED-OUT SPACES

Vasilyeva M.A., Zelentsova A.A.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: hydraulic mixture, pipeline transport, transportation range, narrowing of pipes, flow core, flow structure index.

Abstract. The article considers the urgent task of maintaining the flow rate of the laying hydraulic mixture above critical values, which contributes to achieving stable and efficient conditions for its long-range supply. To study the flow, 3-D modeling of the flow of a non-Newtonian fluid was performed, which made it possible to assess the degree of influence of a gradual change (decrease) in the diameter of the pipe on the formation of the flow core and identify characteristic zones of the flow structure formed along the length of the sections under consideration. The distinctive features of the distribution of velocity fields along the pipe section during the passage of the constriction are presented in order to preserve the uniformity of the flow by maintaining kinetic energy. The results obtained are the basis for substantiating the choice of the ratios of the diameters of the pipeline system of the laying complex when moving hydraulic mixtures with different rheological properties.

Введение

Закладка выработанного пространства обеспечивает поддержание кровли, предотвращая ее деформацию и управляя горным давлением, что повышает уровень безопасности ведения горных работ, а также способствует повышению полноты извлечения полезных ископаемых [1].

Среди множества способов подачи закладочного материала для возведения искусственного массива большая доля принадлежит трубопроводному транспорту гидросмесей. Он позволяет реализовать непрерывную подачу материала с поверхности на большие расстояния, а также обеспечить постоянство состава и неизменность технологий подготовки, гарантируя обеспечение качественных характеристик формируемого массива. Однако дальность транспортирования существенно ограничена, в том числе и свойствами перемещаемого материала [2, 3].

Гидросмесь представляет собой механическую смесь несущей среды с твердыми частицами, которая проявляет аномальные реологические свойства при движении. На характер транспортирования потока оказывают влияние множество параметров гидросмеси, такие как концентрация, консистенция, плотность смеси, крупность и форма частиц наполнителя, их форма [4, 5]. Совокупность этих свойств определяет энергетический режим перемещения потока, задавая уровень критической скорости для устойчивой реализации этого процесса.

В условиях горных предприятий применяют различные способы интенсификации транспортирования закладочной смеси. Так, помимо активных, к которым относят применение дополнительного насосного оборудования и различных активаторов, применяют и пассивные способы, реализующих свою функцию без механического воздействия на перемещаемый поток. Среди последних особо можно отметить применение различных футеровок внутренних поверхностей труб, что в совокупности с использованием различных пластифицирующих добавок, способствует снижению гидравлических сопротивлений [6, 7]. Однако, хоть это и позволяет существенно снизить экономические и энергетические затраты на гидротранспортирование, но техническую задачу увеличения дальности подачи гидросмеси не решает.

Одним из перспективных способов увеличения дальности транспортирования гидросмеси, нашедших применение при разработке месторождений Азиатско-Тихоокеанского региона, является поэтапное уменьшение диаметра трубы. Так, при реализации проекта Minas-Rio (Бразилия), для транспортирования концентрата железной руды применяется трубопровод протяженностью 522 км, с переменным диаметром от 660 до 610 мм, который после завершения строительства станет самым крупным в мире. Трубопровод на руднике Antamina (Чили), протяженностью около 300 км с переменным диаметром от 250 до 210 мм позволяет поддерживать скорость транспортирования полиметаллического концентрата на уровне достаточном для предотвращения его заиливания.

Снижение скорости ниже критического значения гидросмеси способствует выпадению дисперсной фазы в донные слои, расслаивая поток, приводя к заиливанию трубы и, в итоге, к закупорке трубопровода. Частицы, формирующие осадочный слой, перемещаются в механическом контакте с материалом трубы и способствуют интенсификации его гидроабразивного изнашивания. В результате повышается шероховатость рабочей поверхности трубопровода увеличивает удельное сопротивление движению. Исследование специфики движения взвешенносущего потока сплошной среды позволит сформулировать условия, при которых достигается увеличение дальности перемещения гидросмеси, в том числе за счет снижения энергоемкости процесса [8-10].

Методика проведения исследований. Постановка задачи

Подача закладочной смеси осуществляется с поверхностного комплекса, и высота вертикального участка обеспечивает поступление закладочной смеси в выработку по системе трубопроводов. Под действием сформированного уровня гидростатического напора гидросмесь движется по горизонтальным участкам. Условием ее транспортирования является положительный перепад давлений по длине трубопровода, определяемый согласно уравнению Бернулли:

$$\frac{v_{Г1}^2}{2g} + \frac{P_1}{g\rho_{Г}} + h_1 = \frac{v_{Г2}^2}{2g} + \frac{P_2}{g\rho_{Г}} + h_2 + \sum i_x L_{dt}, \quad (1)$$

где $\frac{v_{Г1}^2}{2g}$ и $\frac{v_{Г2}^2}{2g}$ – кинетические энергии в рассматриваемых сечениях; $v_{Г1}$ и $v_{Г2}$ – скорости в

начале и конце рассматриваемого участка трубопровода, м/с; $\frac{P_1}{g\rho_{Г}}$ и $\frac{P_2}{g\rho_{Г}}$ – потенциальные

энергии в тех же сечениях; P_1 и P_2 – давление в начале и конце рассматриваемого участка трубопровода, Па; $\rho_{Г}$ – плотность гидросмеси; g – ускорение свободного падения, м/с²;

h_1 и h_2 – высотные отметки потока в начале и конце участка, м; $\sum i_x L_{dt}$ – величина потери напора между рассматриваемыми сечениями участка трубопровода L за время прохождения dt гидросмесью; i_x – линейные потери, м.

Закладочная гидросмесь является гетерогенным материалом и для ее эффективного перемещения необходимо подобрать скоростные параметры потока, препятствующие расслоению и способствующие сохранению реологических характеристик.

Гидравлические потери потока представляют собой сумму линейных и местных сопротивлений [11, 12]:

$$h_{\text{пот}} = i_x + h_m, \quad (2)$$

где h_m – местные потери в трубопроводе.

Линейные потери определяются согласно выражению

$$i_x = \frac{1}{l} \left[\left(h_1 + \frac{P_1}{\gamma} \right) - \left(h_2 + \frac{P_2}{\gamma} \right) \right], \quad (3)$$

где l – длина участка трубопровода, м; γ – удельный вес, Н/м³.

Уровень критической скорости соответствует минимальной скорости потока, при которой частицы дисперсной фазы находятся во взвешенном состоянии. Уменьшение живого сечения потока способствует увеличению скоростного напора, а также к снижению уровня потребного напора, необходимого для перемещения гидросмеси на заданное расстояние. Изменение скорости движения смеси в трубопроводе сопровождается изменением уровня потерь энергии согласно выражению:

$$v = \frac{g}{32\nu} i_x D^2, \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с; D – диаметр трубы, м.

Однако повышение скорости потока посредством поэтапного сужения живого сечения сопровождается дополнительным увеличением сопротивления движению за счет формирования участков местных сопротивлений, определяемых согласно формуле Вейсбаха с учетом формулы Идельчика резкого сужения [13]:

$$h_m = 0,5 \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right) \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5)$$

где F_1 и F_2 – площади поперечного сечения трубы, соответственно перед сужением и после него, м²; v_2 – скорость течения жидкости после сужения трубопровода, м/с.

Для эффективного трубопроводного транспортирования закладочных смесей необходимо обеспечить условия реализации наименьшей энергоемкости процесса перемещения материала с сохранением реологических характеристик. С целью анализа параметров процесса перемещения потока в руслах переменного сечения в программе COMSOL Multiphysics разработана модель мультифизического анализа.

Моделирование. Результаты

Для моделирования трехмерного устойчивого потока неньютоновской и несжимаемой жидкости в трубе использована модель турбулентности к-ε. Данная модель фокусируется на механизмах, влияющих на кинетическую энергию турбулентности [14, 15]. В исследовании поток гидросмеси принят однофазным. Учет состояния потока как реальной гидросмеси выполнен посредством определения коэффициента консистенции, определяющим величину предельного напряжения сдвига [16-18].

Для описания реологических свойств гидросмеси используется обобщенная степенная модель Гершеля-Балкли [19].

$$\tau = m \left(\frac{du}{dy} \right)^n + \tau_0, \quad (6)$$

где m – показатель консистенции потока; n – безразмерный показатель поведения потока; τ_0 – начальное напряжение сдвига; $\frac{du}{dy}$ – градиент скорости (относительный сдвиг).

Тип гидросмеси определяется показателем поведения жидкости n , когда он выше единицы – это соответствует свойствам дилатантной жидкости, принят равным 1,4. Коэффициент консистенции – 1,4. Плотность вещества принята равной 1200 кг/м³. Входная скорость потока задана 2,5 м/с, давление на входе и выходе соответствует нормальным условиям – 101,3 кПа.

Трехмерная модель трубопровода ограничена тремя поверхностями: границы входа и выхода, а также цилиндрическая стенка. Расчет методом конечных элементов в области живого сечения потока выполнен при формировании нормальной расчетной сетки по рабочей поверхности трубопровода. В качестве сужения принят переход диаметров, выполненный под прямым углом между исследуемыми участками труб. Исходный диаметр составляет 0,22 м, итоговый – 0,14 м, шаг изменения диаметра – 0,01 м. Фокусная длина рассматриваемого участка трубы выбрана с учетом достижения процессами массопереноса установившегося характера движения, и составила 0,75 м [20, 21].

Результаты исследования позволили оценить влияние изменения гидравлического радиуса потока на распределение скорости в сечении трубопровода. Для обоснования типа рассечения потока и последующего анализа полей скорости выполнено расслоение потока в плоскости Oxy (рис. 1) [22-24].

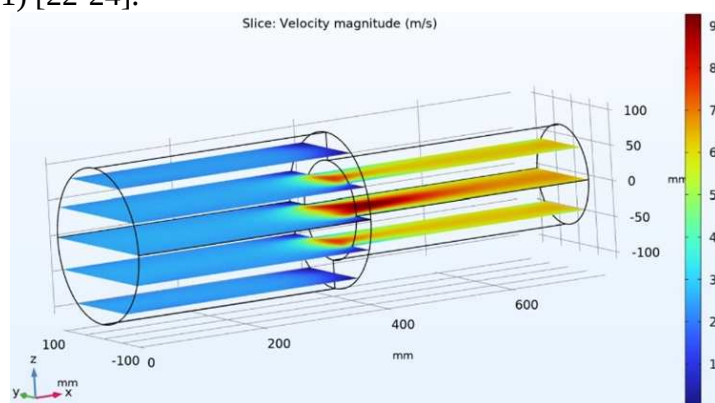


Рис. 1. Распределение полей скорости в потоке гидросмеси (составлено авторами)

Картина распределения полей скорости отражает, что турбулентный поток полностью развит и аксиально симметричен моделируемых горизонтальных трубах, – гидравлическая ось потока и геометрическая ось трубы совпадают. Это позволило дальнейшую оценку выполнять при формировании единственного сечения по оси симметрии.

Уменьшение диаметра трубопровода при перекачивании гидросмеси закономерно способствует росту скорости потока [25-27]. Формируемые поля скорости иллюстрируют реализацию процессов, носящих инерционный характер, и обусловленных влиянием участков местных сопротивлений (рис. 2, а-в).

Смена радиального направления векторов скорости на осевое (зона А) способствует формированию ядра потока (зона В), в котором поток достигает максимальной скорости и степени сжатия. Увеличение скорости обусловлено разницей величин диаметров на участке сужения. Перемещаясь в трубопроводе, под действием сил внутреннего трения и сопротивления по длине, скорость потока снижается и относительно равномерно распределяется по сечению трубы (зона С).

Анализ результатов вычислений показал, что протяженность каждой из зон находится в минимальной зависимости от изменения диаметра ΔD и обусловлена углом входа потока в сужение, определяемого его конструкцией (рис. 3, а). Однако стоит отметить, что уровень максимальной скорости, достигаемой в этих областях, значительно возрастает с повышением величины ΔD (рис. 3, б).

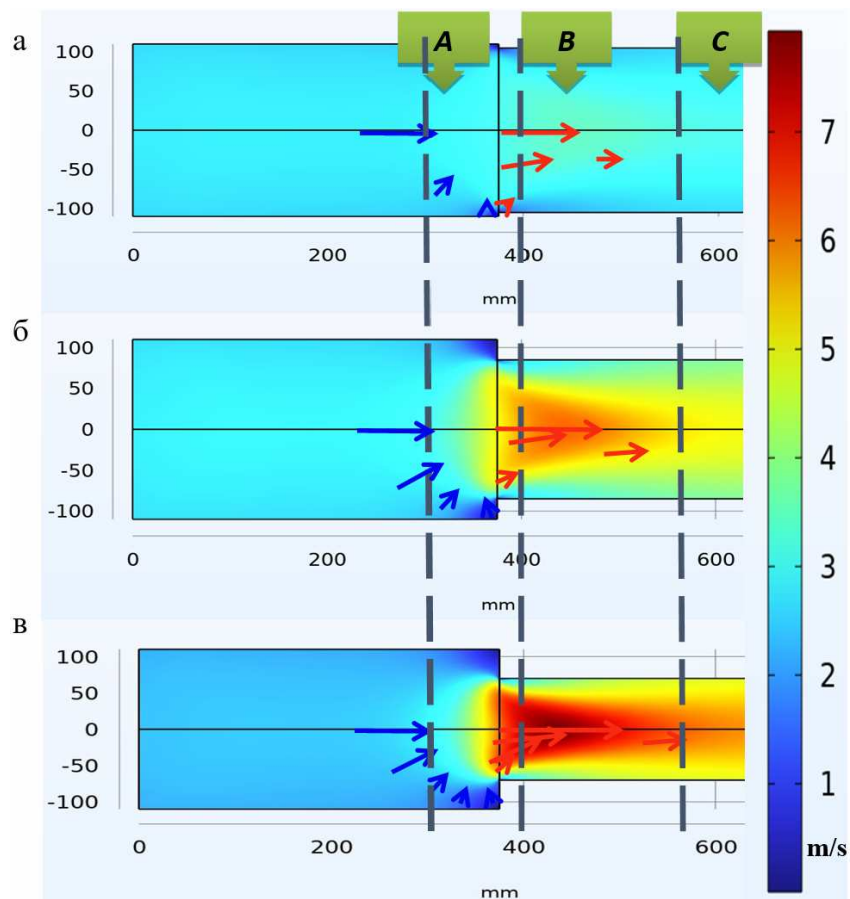


Рис. 2. Формирование ядра потока под действием сужения потока:
а – $\Delta D = 0,01$ м; б – $\Delta D = 0,05$ м; в – $\Delta D = 0,08$ м. (составлено авторами)

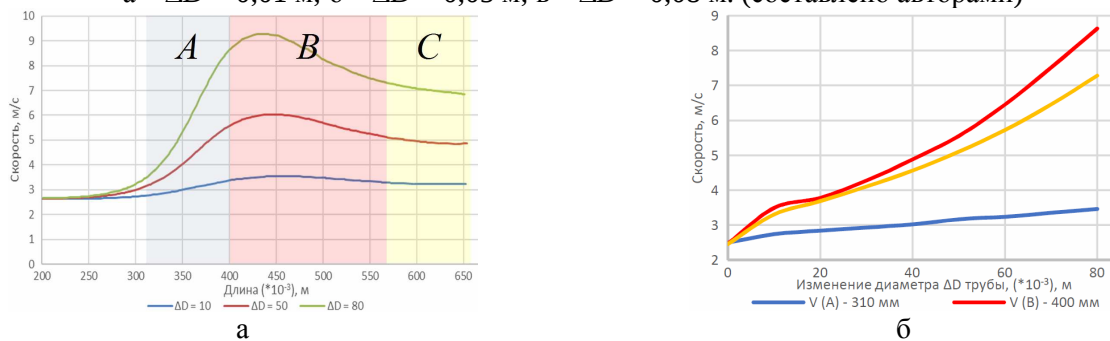


Рис. 3. Динамика изменения скорости потока по оси потока: а – распределение зон изменения скорости по длине потока; б – на границе перехода характерных зон (составлено авторами)

Более полная картина распределения полей локальных скоростей получена при инверсионной обработке результирующих отображений в сечениях, локализованных по центрам симметрии. Сформированные топографические поверхности полей скорости позволили исследовать изменения ядра скорости потока в характерной зоне течения (рис. 4, а). Последовательность итераций образует динамическую систему с не дискретным временем на фазовом пространстве меньшей линейной размерностью. Это позволило установить связь между образуемыми векторными полями скорости формируемого ядра потока и обуславливающей их геометрией сужения трубы.

Для количественной оценки влияния изменения диаметра ΔD на линейные размеры ядра потока, введено понятие индекса структуры ядра потока, определяемого согласно выражению (составлено авторами):

$$i_c = D_B / L_c, \quad (7)$$

где L_c – длина участка потока, на котором наблюдается формирование компактного ядра, м; D_B – диаметр ядра потока на границе зоны B, соответствующей наибольшему сжатию, м.

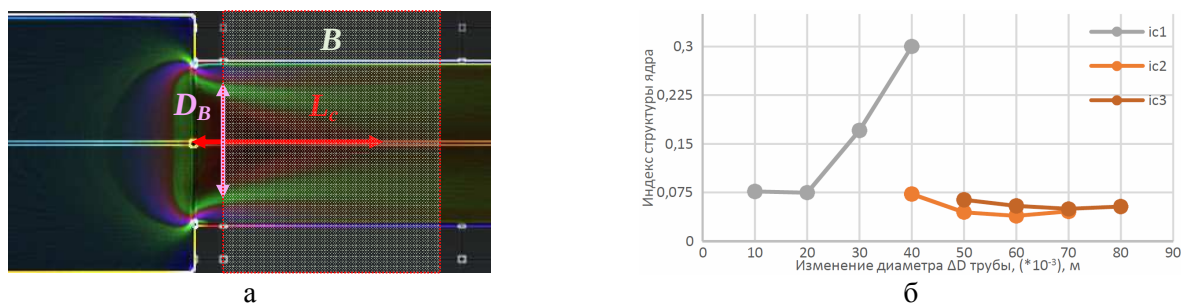


Рис. 4. Распределение скорости потока при сужении потока: а – топографические поверхности полей скорости; б – динамика изменения структуры ядра потока: i_{c1} – первой степени, i_{c2} – второй степени, i_{c3} – третьей степени

По результатам вычислений был получен график изменения индекса структуры ядра потока, который позволяет описать характер его формирования. Динамика изменения структуры ядра отражает поведение векторов скорости при прохождении сужения. Обтекание участков местных сопротивлений, возникающих за счет сужения трубы, сопровождается формированием трубчатых слоев в потоке вследствие отличной интенсивности протекающих инерционных процессов. Они отчетливо выделяются за счет заметной разнице в величине скорости, определяющей степень сжатия в пределах каждого слоя. Чем выше значение индекса структуры ядра, тем больше формируемый диаметр ядра в границе характерной зоны. Это определяет характер перемещения потока, при котором менее выражена неравномерность распределения величины скорости потока в сечении. Одновременно с этим, увеличение ΔD способствует выделению в потоке, за счет инерционности сплошной среды, ядра сжатия потока второй и третьей степени. Наблюдаемая тенденция изменения величины индекса структуры потока для разных степеней сжатия подтверждает подобие протекающих при этом физических процессов. Они характеризуются реализацией процесса массообмена между ядром и трубчатой зоной, которому способствует отклонение векторов скорости единичных объемов и суммарные гидравлические потери энергии потока.

Выводы

Обеспечение дальности транспортирования закладочных гидросмесей осложняется сложностью соблюдения требуемых качественных характеристик искусственного массива за счет снижения кинетической энергии потока, что способствует потере однородности материала. Достаточный уровень кинетической энергии потока, предотвращающий расслоение потока, может быть достигнут применением трубопроводных систем с поэтапным уменьшением диаметра.

Выполненные исследования показали, что изменение диаметра трубы способствует формированию характерной зоны сжатия с отчетливым выделением ядра потока, обладающей наибольшей скоростью, симметрично распределенной относительно оси. Протяженность характерных зон не зависит от величины изменения диаметра ΔD , а только от конструктивной реализации перехода – угла перехода. Это объясняется проявлением инерционности транспортируемого вещества при резком изменении направления векторов скорости единичных объемов. Динамика роста скорости по мере обтекания участка сопротивления приводит к формированию трубчатого слоя жидкости, прилегающего к внутренней поверхности трубы, и ядра потока, характеризуемого индексом структуры. Величина скорости, реализуемая в формируемом ядре потока, находится в квадратичной зависимости от величины изменения диаметра трубы ΔD .

Дальнейшие исследования, направленные на обоснование выбора величины соотношения диаметров трубопровода при транспортировании веществ повышенной плотности и концентрации, позволят обеспечить поддержание заданного уровня скорости потока при увеличении расчетного участка трубы.

Список литературы

1. Iordanov I., Novikova Yu., Simonova Yu., Yefremov O., Podkopayev Ye., Korol A. Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass // *Mining of Mineral Deposits*. 2020, no. 14(3), pp. 119-127. DOI: 10.33271/mining14.03.119.
2. Ming-zhi Li, Yan-ping He, Ya-dong Liua, Chao Huang. Hydrodynamic simulation of multi-sized high concentration slurry transport in pipelines // *Ocean Engineering*. 2018, vol. 163, pp. 691-705. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.046.
3. Abd Al Aziz I., Mohamed H.I. A Study of the Factors Affecting Transporting Solid— Liquid Suspension through Pipelines // *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2013, vol. 3, no. 3, p. 152-162. DOI: 10.4236/ojfd.2013.33020.
4. Александрова Т.Н., Потемкин В.А. Разработка методики оценки процесса гидроциклонирования с учетом реологических параметров минеральной суспензии // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 252. – С. 908-916. – DOI: 10.31897/PMI.2021.6.12.
5. Ihle C.F. Economic pipe diameter of settling slurries // *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 264, p. 121475. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121475.
6. Ye H., Gao X., Wang R., Wang H. Relationship among particle characteristic, water film thickness and flowability of fresh paste containing different mineral admixtures // *Construction and Building Materials*. 2017, vol. 153, pp. 193-201. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.
7. Атрощенко В.А., Александров В.И. Повышение эффективности транспортных трубопроводов закладочного комплекса применением полиуретанового покрытия // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – №10-1. – С. 25-38. – DOI: 25018/0236_1493_2022_101_0_25.
8. Александров В.И., Тимухин С.А., Махараткин П.Н. Энергетическая эффективность гидравлического транспорта хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе // *Записки Горного института*. – 2017. – Т. 225. – С. 330-337. – DOI: 10.18454/PMI.2017.3.330.
9. Pavlov M.V., Vafaeva K.M., Karpov D.F. and etc. Determination of Pipe Diameter Using Optimization Method // *E3S Web of Conferences*. 2024, vol. 581, p. 01044. DOI: 10.1051/e3sconf/202458101044.
10. Christian Ihle. The least energy and water cost condition for turbulent, homogeneous pipeline slurry transport // *International Journal of Mineral Processing*. 2016, vol. 148, pp. 59-64. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.01.011.
11. Kfuri S.L.D., Soares E.J., Thompson R.L., Siqueira R.N. Friction coefficients for Bingham and power-law fluids in abrupt contractions and expansions // *Journal of Fluids Engineering*. 2017, vol. 139(2), p. 021203. DOI: 10.1115/1.4034521.
12. Khvostov A., Zhuravlev A., Shipilova E., Boger A. Calculation of local resistance coefficient at isothermal flow of non-Newtonian non-compressible liquid in cylindrical channel with sudden narrowing // *Modeling of systems and processes*. 2023, vol. 16(3), pp. 114-128. DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-3-114-128.
13. Адамов Г.А., Идельчик И.Е. Экспериментальное исследование турбулентного течения в начальных участках прямых труб круглого и квадратного сечений. – М.: Тип. ЦАГИ, 1948. – 14 с.
- 14-24. *См. References*
25. Борзенко Е.И., Рыльцева К.Е., Шрагер Г.Р., Численное исследование характеристик течения неньютоновской жидкости в трубе с внезапным сужением // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. – 2019. – №58. – С. 56-70. – DOI: 10.17223/19988621/58/5.
26. Гарифуллин Ф.А., Тазюков Ф.Х., Шайхетдинова Р.С. Изучение течения жидкостей при внезапном сужении. (Входные течения) // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – Т. 16, № 10. – С. 109-113.
27. Kim-E M.E., Brown R.A., Armstrong R.C. The roles of inertia and shear-thinning in flow of an inelastic liquid through an axisymmetric sudden contraction // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1983, vol. 13, pp. 341-363. DOI: 10.1016/0377-0257(83)80028-7.

References

1. Iordanov I., Novikova Yu., Simonova Yu., Yefremov O., Podkopayev Ye., Korol A. Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass // *Mining of Mineral Deposits*. 2020, no. 14(3), pp. 119-127. DOI: 10.33271/mining14.03.119.
2. Ming-zhi Li, Yan-ping He, Ya-dong Liua, Chao Huang. Hydrodynamic simulation of multi-sized high concentration slurry transport in pipelines // *Ocean Engineering*. 2018, vol. 163, pp. 691-705. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.046.
3. Abd Al Aziz I., Mohamed H.I. A Study of the Factors Affecting Transporting Solid— Liquid Suspension through Pipelines // *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2013, vol. 3, no. 3, p. 152-162. DOI: 10.4236/ojfd.2013.33020.
4. Aleksandrova T.N., Potemkin V.A. Development of a methodology to assess the hydrocyclone process with account of the rheological properties of the mineral slurry // *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 908-916. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.12.
5. Ihle C.F. Economic pipe diameter of settling slurries // *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 264, p. 121475. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121475.
6. Ye H., Gao X., Wang R., Wang H. Relationship among particle characteristic, water film thickness and flowability of fresh paste containing different mineral admixtures // *Construction and Building Materials*. 2017, vol. 153, pp. 193-201. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.

7. Atroshchenko V.A., Aleksandrov V.I. Increasing the Efficiency of the Transport Pipelines of the Stowing Complex with the Application of a Polyurethane Coating // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022, no. 10-1, pp. 25-38. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_25.
8. Aleksandrov V.I., Timukhin S.A., Makharatkin P.N. Energy efficiency of hydraulic transportation of iron ore processing tailings at Kachkanarsky MPP // Journal of Mining Institute. 2017, vol. 225, pp. 330-337. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.330.
9. Pavlov M.V., Vafaeva K.M., Karpov D.F. and etc. Determination of Pipe Diameter Using Optimization Method // E3S Web of Conferences. 2024, vol. 581, p. 01044. DOI: 10.1051/e3sconf/202458101044.
10. Christian Ihle. The least energy and water cost condition for turbulent, homogeneous pipeline slurry transport // International Journal of Mineral Processing. 2016, vol. 148, pp. 59-64. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.01.011.
11. Kfuri S.L.D., Soares E.J., Thompson R.L., Siqueira R.N. Friction coefficients for Bingham and power-law fluids in abrupt contractions and expansions // Journal of Fluids Engineering. 2017, vol. 139(2), p. 021203. DOI: 10.1115/1.4034521.
12. Khvostov A., Zhuravlev A., Shipilova E., Boger A. Calculation of local resistance coefficient at isothermal flow of non-Newtonian non-compressible liquid in cylindrical channel with sudden narrowing // Modeling of systems and processes. 2023, vol. 16(3), pp. 114-128. DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-3-114-128.
13. Adamov G.A., Idelchik I.E. Experimental study of turbulent flow in the initial sections of straight pipes of round and square sections. – M.: TsAGI Printing House, 1948. – 14 p.
14. Messa G.V., Matoušek V. Analysis and discussion of two fluid modelling of pipe flow of fully suspended slurry // Powder Technology. 2019, vol. 360, pp. 747-768. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.017.
15. Kumar G.M., Kaushal D.R. Modeling of sand-water slurry flow through horizontal pipe using CFD // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2016, vol. 64, pp. 261-272. DOI: 10.1515/johh-2016-0027.
16. Sape A.M. The heterogeneous to homogeneous transition for slurry flow in pipes // Ocean Engineering. 2016, vol. 123, pp. 422-431. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.07.031.
17. Pang B., Wang S., Chen W., Hassan M., Lu H. Effects of flow behavior index and consistency coefficient on hydrodynamics of power-law fluids and particles in fluidized beds // Powder Technology. 2020, vol. 366, pp. 249-260. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.01.061.
18. Dhruv M., Adithya Krishnan Thota Radhakrishnan, Jules Van Lier and Francois Clemens // Sensitivity Analysis of a Wall Boundary Condition for the Turbulent Pipe Flow of Herschel–Bulkley Fluids // Water. 2019, vol. 11(1), p. 19. DOI: 10.3390/w11010019.
19. Bartosik A. Modelling of a turbulent flow using the Herschel-Bulkley rheological model // Chemical and Process Engineering. 2006, vol. 27(3), pp. 623-632.
20. Dennis S.C.R., Smith F.T. Steady Flow Through a Channel with a Symmetrical Constriction in the Form of a Step // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1980, vol. 372(1750), pp. 393-414. DOI: 10.1098/rspa.1980.0119.
21. Dennis S.C.R., Smith F.T. Steady Flow Through a Channel with a Symmetrical Constriction in the Form of a Step // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1980, vol. 372(1750), pp. 393-414. DOI: 10.1098/rspa.1980.0119.
22. Emilio J.V., José M.M., Miguel A.H., Alfonso M.G. Global and local instability of flow focusing: The influence of the geometry // Physics of Fluids. 2010, vol. 22, p. 064105. DOI: 10.1063/1.3450321.
23. Chiang T.P., Sheu T.W.H., Hwang R.R. Numerical studies of a three-dimensional flow in suddenly contracted channels // Physics of Fluids. 2002, vol. 14(5), pp. 1601-1616. DOI: 10.1063/1.1459719.
24. Kubrak M., Malesinska A., Kodura A., Urbanowicz K., Stosiak M. Hydraulic Transients in Viscoelastic Pipeline System with Sudden Cross-Section Changes // Energies. 2021, vol. 14, p. 4071. DOI: 10.3390/en14144071.
25. Kubrak, M.; Malesinska, A.; Kodura, A.; Urbanowicz, K.; Stosiak, M. Hydraulic Transients in Viscoelastic Pipeline System with Sudden Cross-Section Changes. Energies 2021, 14, 4071. DOI: 10.3390/en14144071.
26. Borzenko E.I., Ryltseva K.E., Schrager G.R., Numerical investigation of the characteristics of a non-Newtonian fluid flow in a pipe with sudden constriction // Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics. 2019, no. 58, pp. 56-70. DOI: 10.17223/19988621/58/5.
27. Garifullin F.A., Tazyukov F.H., Shaikhetdinova R.S. The study of fluid flow during sudden constriction. (Input currents) // Bulletin of Kazan Technological University. 2013, vol. 16, no. 10, pp.109-113.
28. Kim-E M.E., Brown R.A., Armstrong R.C. The roles of inertia and shear-thinning in flow of an inelastic liquid through an axisymmetric sudden contraction // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 1983, vol. 13, pp. 341-363. DOI: 10.1016/0377-0257(83)80028-7.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Васильева Мария Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин	Vasilyeva Maria Aleksandrovna – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of transport technological processes and machines
Зеленцова Анна Александровна – аспирант	Zelentsova Anna Aleksandrovna – postgraduate student
eskanord@yandex.ru	

Получена 07.02.2025