DOI: *10.18454/PMI.2017.3.338*

УДК 622:276

ТЕЧЕНИЕ КРУПНОЗЕРНИСТЫХ ГИДРОСМЕСЕЙ В ТРУБАХ

Павел ВЛАСАК
Институт гидродинамики Чешской академии наук, Прага, Чехия

Статья посвящена оценке влияния средней скорости и общей концентрации на соотношение снижения давления и средней скорости потока и распределение локальной концентрации частиц. Экспериментальные исследования проводились на замкнутом трубопроводе с внутренним диаметром труб D = 100 мм, состоящим из горизонтальных, наклонных и вертикальных участков труб из гладкой нержавеющей стали. Снижение давления на трение в горизонтальной трубе было существенно выше, чем в вертикальной из-за того, что контактная нагрузка стратифицированного потока приводила к значительной потере энергии. Снижение давления на трение смеси крупных частиц в вертикальной трубе увеличивалось с увеличением концентрации и скорости потока, что подтверждает влияние внутреннего трения, столкновений частиц друг с другом и торможения потока из-за проскальзывания смеси воды и частиц. Было установлено, что для стратифицированной смеси воды и крупных частиц наклон труб не оказывал существенного влияния на снижение давления, особенно при низких значениях концентрации. Влияние наклона трубы уменьшалось с увеличением скорости смеси в восходящей трубе, максимальное значение достигалось при наклоне от 20 до 40°. В наклонной трубе максимум снижения давления достигался по мере уменьшения скорости потока. В нисходящей трубе фрикционное снижение давления постепенно уменьшалось по мере увеличения угла наклона. Влияние наклона на снижение давления можно практически не учитывать, особенно при низкой концентрации и высокой скорости потока. Исследование показало, что смесь воды и крупных частиц в горизонтальной и наклонной трубе существенно стратифицируется. Частицы преимущественно находятся в слое рядом с нижней частью трубы. Однако при высокой и средней скорости потока частицы передвигаются к центральной части поперечного сечения трубы, а при транспортировке частиц основным способом перемещения становилась их сальтация [1].

***Ключевые слова*:** гидротранспорт, установка труб для транспортировки крупных частиц, падение давления, наклон трубы

***Как цитировать эту статью*:** Власак Павел. Течение крупнозернистых гидросмесей в трубах // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 338-341. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.338

Гидравлический транспорт по трубопроводам используется для перемещения насыпных материалов, например угля, руды и пустой породы. Чаще всего транспортируют относительно мелкую фракцию, которая в турбулентном потоке удерживается при помощи турбулентной диффузии сердцевины самого потока. Подъемная сила возле стенок трубы способствует перемещению частиц. Транспортировка крупных частиц по трубопроводам менее распространена по причине повышенного износа труб, высокого уровня затрачиваемой энергии, высокой скорости осаждения и соответствующего возрастания рабочих скоростей и постепенного ухудшения состояния и качества материалов. Тем не менее, использование трубопровода для перемещения крупнозернистой гетерогенной смеси различных твердых материалов является потенциально важным направлением в горной и строительной промышленности, а также при выемке грунта и транспортировке полиметаллических конкреций со дна океана [5, 10].

Для безопасной, надежной и экономичной работы транспортных трубопроводов необходима подробная информация о перемещаемой смеси вода – частицы. Понимание поведения потока смеси позволяет оптимизировать характеристики транспортировки и затрат энергии, улучшить качество, безопасность, экономику и надежность процесса. Понимание поведения потока, знание пределов осаждения, рабочей скорости материала и потерь давления при движении смеси в горизонтальной, вертикальной и наклонной трубе необходимо для безопасной и эффективной проектировки, установки и работы данного трубопровода [6].

Большое количество теоретических и практических работ посвящено транспортировке песка и мелкофракционного материала в горизонтальных трубах [2-4, 10, 11]. Существует относительно немного исследований по гидравлической транспортировке щебня и более крупных частиц, особенно в вертикальных и наклонных трубах. Теоретические исследования гетерогенной смеси весьма ограничены из-за нехватки экспериментальных данных о поведении потока и внутренней структуры смеси.

Данная работа посвящена оценке влияния средней скорости смеси и общей концентрации на изменение соотношения давления и средней скорости потока, а также на поведение потока и локальное распределение концентрации частиц. Экспериментальные исследования проводились

DOI: 10.18454/PMI.2017.3.338

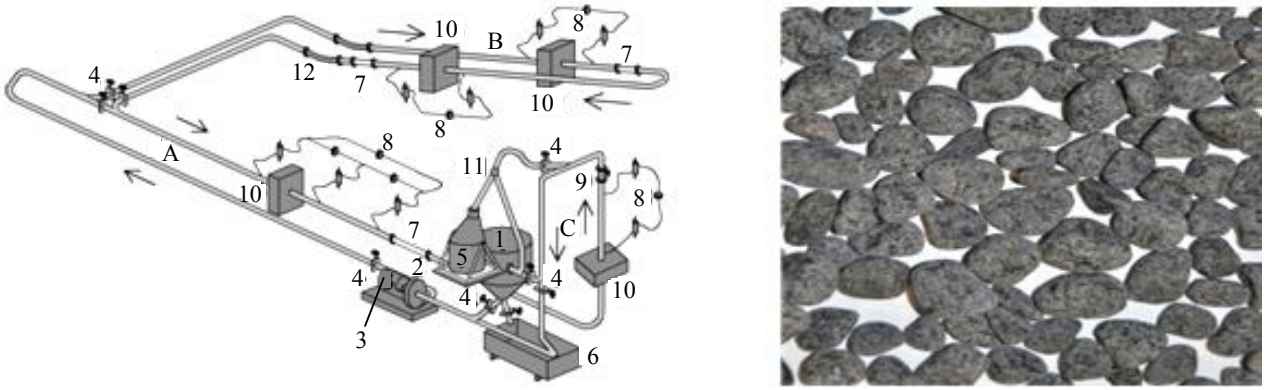


Рис.1. Экспериментальный замкнутый трубопровод с внутренним диаметром D = 100 мм для транспортировки отсортированного базальтового щебня

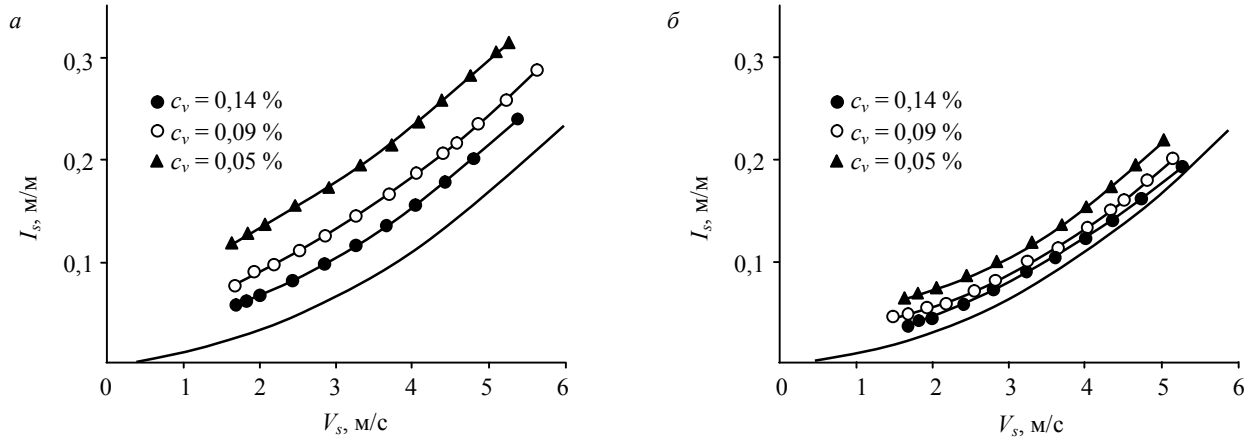


Рис.2. Снижение давления I_s в горизонтальной (*а*) и вертикальной трубах (*б*)

в замкнутом трубопроводе с внутренним диаметром D = 100 мм, который состоит из труб из гладкой нержавеющей стали и горизонтальных (A), наклонных и вертикальных (B) секций (рис.1).

Смесь поступает из смесительной емкости (1) в трубопровод при помощи центробежного насоса GIW LCC-M 80-300 (2) с приводом с переменной скоростью Siemens 1LG4283-2AB60-Z A11 (3). Снижение давления I_s измерялось при помощи датчика перепада давления Rosemount 1151DP (8) на двухметровом участке для проведения замеров, средняя скорость потока V_s измерялась магнитным расходомером Krohne OPTIFLUX 5000 (9), установленном на короткой вертикальной трубе (C) в конце трубопровода. В трубе со смотровым окном (7) фиксировалось движение потока при помощи высокоскоростной цифровой камеры NanoSence MK III+ с частотой до 2000 к/с, разрешение снимка составляло 1280 × 1024 пикселей, частота кадров 200 Гц [7]. Вертикальная труба U-й формы (B) позволяет оценивать концентрацию твердой фазы. Для измерения местной концентрации твердых частиц трубопровод был оснащен радиометрическим измерителем плотности (10). Вода использовалась в качестве несущей жидкости, общая концентрация c_v варьировалась от 3 до 15 %. Тестируемые смеси состояли из сортированного базальтового щебня с узким распределением размеров частиц (диаметр частиц изменялся от 8 до 16 мм, средний диаметр d_{50} = 11,0 мм, плотность ρ_p = 2787 кг/м$^{-3}$) (рис.1).

Влияние концентрации смеси и скорости на потери давления в горизонтальных и вертикальных трубах показано на рис.2. Гидростатический эффект $\Delta p = (\rho_s - \rho_o) g \Delta h$, где ρ_s и ρ_o – плотность смеси и несущей жидкости соответственно; Δh – высота столба смеси. Практически параллельные зависимости давления и скорости говорят о том, что для стратифицированного потока изменение давления происходило из-за кулоновского трения частиц и трубы [8].

Фрикционное снижение давления в горизонтальной трубе существенно выше, чем в вертикальной, потому что для стратифицированного потока контактная нагрузка вызывает значительные потери энергии [9, 10]. Фрикционное снижение давления крупных частиц смеси в вертикальной трубе повышалось вместе с увеличением концентрации и скорости смеси, что подтвердило

DOI: *10.18454/PMI.2017.3.338*

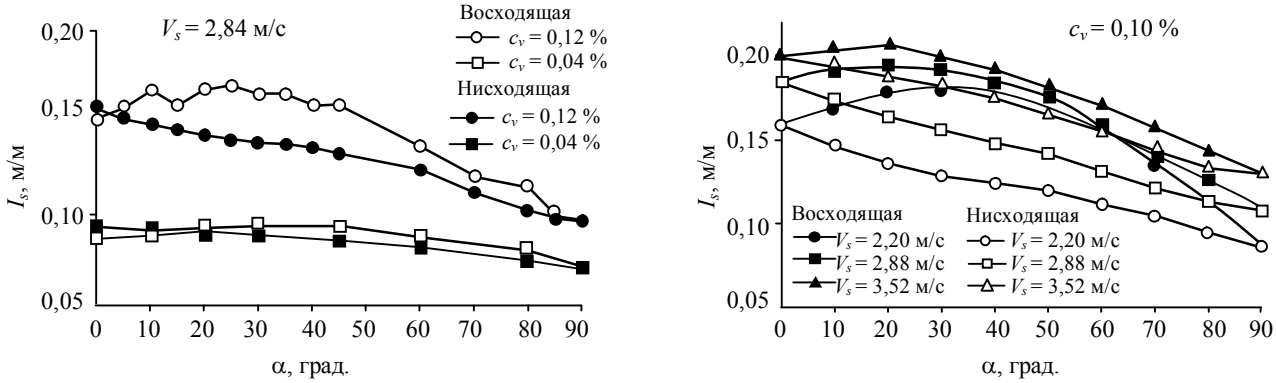


Рис.3. Снижение давления I_s в наклонных трубах

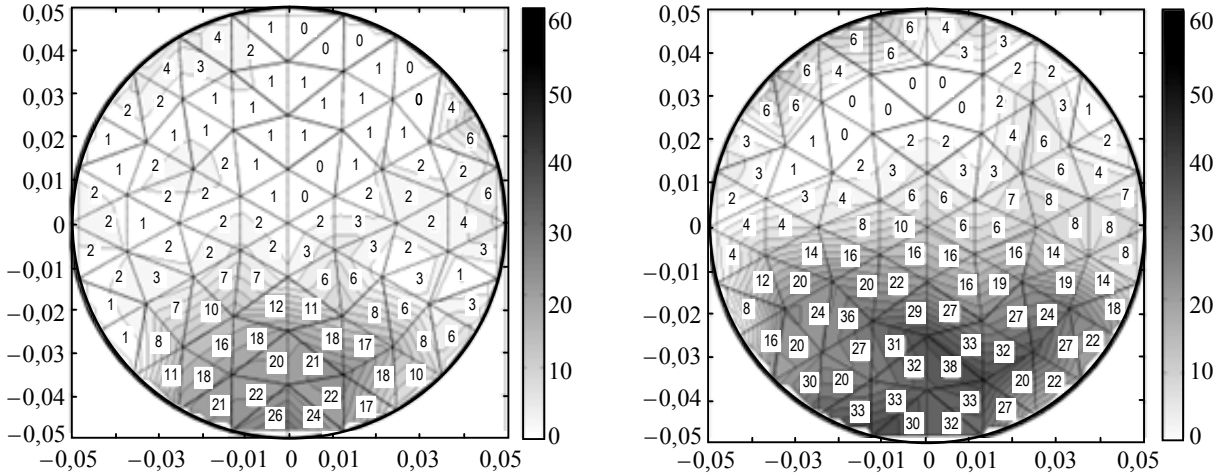


Рис.4. Карты распределения локальной объемной концентрации в горизонтальной трубе

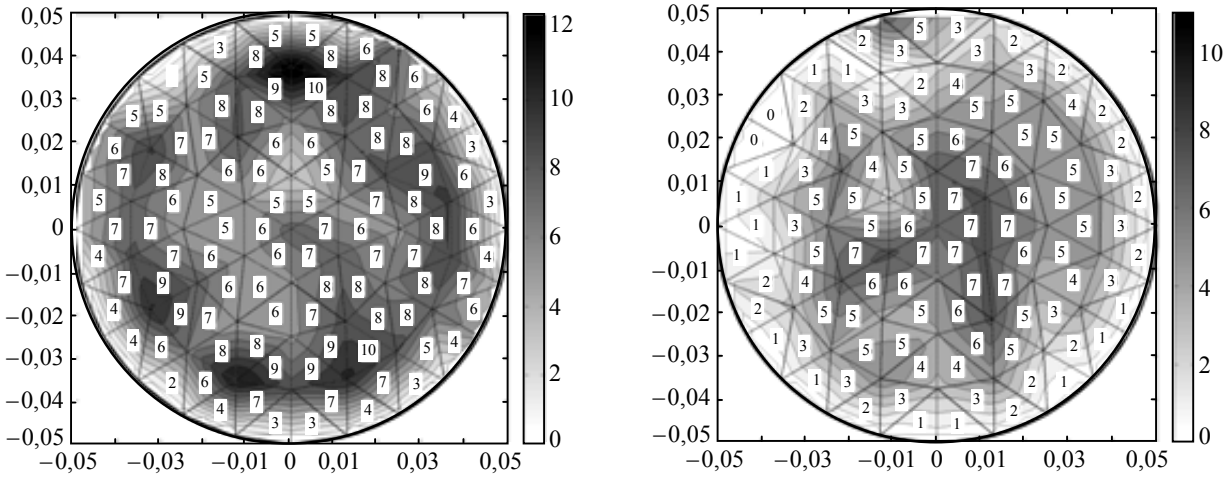


Рис.5. Карты распределения локальной объемной концентрации в вертикальной трубе

влияние внутреннего трения, столкновения частиц друг с другом и торможения из-за проскальзывания частиц в жидкости.

Снижение давления в наклонной трубе можно описать известной формулой Ворстера и Денни [11] и разбить на две части – невосстанавливающееся фрикционное снижение давления и гидростатический дифференциал давления по принципу изменения потенциальной энергии. На рис.3 показано влияние наклона трубы α на изменение давления I_s в наклонной секции для различных значений параметров смеси, ее концентрация и средняя скорость транспортировки V_s.

DOI: *10.18454/PMI.2017.3.338*

Было установлено, что в случае стратифицированной смеси воды и крупных частиц наклон трубы несущественно влиял на фрикционное снижение давления, особенно в случае низких значений концентрации. Влияние наклона трубы снижалось по мере увеличения скорости смеси в восходящей трубе; максимальное значение достигалось между углами 20 и 40°. Максимальное снижение давления в наклонной трубе увеличивалось с уменьшением скорости смеси. В нисходящей трубе фрикционное снижение давления постепенно уменьшалось с увеличением наклона участка. Влиянием угла наклона на фрикционное снижение давления можно практически пренебречь, особенно в случае низкой концентрации смеси и высокой скорости потока.

Локальное распределение концентрации важно для понимания физического механизма потока гетерогенной смеси, оно имеет существенное влияние на поведение смеси и снижение давления. Распределение концентрации измерялось при помощи зонда гамма-излучения и анализа взаимосвязи скорости смеси и ее концентрации.

Из карт локальной концентрации очевидно, что транспортируемые частицы имеют тенденцию занимать нижнюю часть трубы (рис.4). Концентрация возле боковых стенок немного меньше, чем в центральной части сечения трубы. Карты концентрации позволяют оценить локальную концентрацию частиц c_{in} и сравнить ее с концентрацией при транспортировке c_v, которая зависит от скорости скольжения частиц (например, разность скорости частиц и несущей жидкости).

Изучение локальной концентрации в вертикальной трубе показало влияние скорости падения частиц на концентрацию смеси (рис.5). Концентрация в локальной области достигала более высоких значений в восходящей трубе, чем в нисходящей. Характер структуры потока и распределение концентрации наблюдались на различных участках восходящих и нисходящих труб. В случае нисходящего участка концентрация достигала максимума в центральной части трубы, по направлению к стенкам трубы локальная концентрация постепенно снижалась. В восходящей трубе максимальная концентрация наблюдалась в форме кольца, начиная от радиуса $r = 0{,}15D$ до $r = 0{,}40D$, с увеличением скорости потока ширина кольца также увеличивалась.

Исследования показали, что смеси из воды и крупных частиц в горизонтальных и наклонных трубах были существенно стратифицированы. Частицы по большей части передвигались в слое рядом с нижней части трубы. При более высокой или средней скорости потока частицы передвигаются в центральную часть поперечного сечения трубы, основным способом перемещения частиц становилась сальтация [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lukerchenko N.* 3D numerical model of a spherical particle saltation in channel with rough fixed bed / N.Lukerchenko, S.Piatsevich, Z.Chara, P.Vlasak. Hydrol. Hydromech. 2009. Vol. 57(2). P.100-112.

2. *Matousek V.* On equivalent roughness of mobile bed at high shear stress / V.Matousek, J. Krupicka // Hydrol. Hydromech. 2009. Vol. 57(3). P. 191-199.

3. *Newitt D.M.* Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes / D.M.Newitt, J.F.Richardson, M.Abbott, R.B.Turtle // Transactions Inst. Chemical Engnrs. 1955. Vol. 33(2). P. 93-113.

4. *Shook C.A.* Slurry Flow: Principles and Practice / C.A.Shook, M.C.Roco. Butterworth-Heinemann. 1991.

5. *Vlasak P.* Effect of particle size and concentration on flow behavior of complex slurries / P.Vlasak, Z.Chara // Proc. of the 7th ISOPE Ocean Mining Symposium. Lisbon, 2007. P. 188-196.

6. *Vlasak P.* Effect of particle size distribution and concentration on flow behavior of dense slurries / P.Vlasak, Z.Chara // Particulate Sci and Technology. 2011. Vol. 29(1). P. 53-65.

7. *Vlasak P.* Flow Structure of coarse-grained slurry in horizontal pipe / P.Vlasak, B.Kysela, Z.Chara // Hydrol. Hydromech. 2012. Vol. 60(2). P.115-124.

8. *Vlasak P.* Fully stratified particle-laden flow in horizontal circular pipe / P.Vlasak, B.Kysela, Z.Chara // Particulate Science and Technology. 2012. Vol. 32(2). P. 179-185.

9. *Vlasak P.* Experimental investigation of coarse-grained particles-water Mixture in Horizontal and Inclined Pipes / P.Vlasak, Z.Chara, J.Krupicka, J.Konfrst // Hydrol. Hydromech. 2014. Vol. 62(3). P. 241-247.

10. *Wilson K.C.* Slurry Transport Using Centrifugal Pumps / K.C.Wilson, G.R.Addie, A.Sellgren, R.Clift. Springer. US, 2006. 3rd edition.

11. *Worster R.C.* The hydraulic transport of solid material in pipes / R.C.Worster, D.F.Denny // Proc. Inst. Mech. Engrs. 1995. N 169/32. P. 563-576.

Автор **Павел Власак,** *д-р техн. наук, профессор, vlasak@ih.cas.cz* (*Институт гидродинамики Чешской академии наук, Прага, Чехия*).

Статья принята к публикации 6.02.2017.