

Характеризуючи роботу збірних труб в цілому, а також приймаючи до уваги діапазон зміни конструктивних характеристик реальних систем, для інженерних розрахунків рекомендується приймати $\alpha \approx 1,3$; $\alpha_0 \approx 1,1$.

Список літератури

1. *Василенко А.А., Кравчук А.М.* Гидравлический расчет перфорированных сборных трубопроводов произвольной длины. //Гидравлика и гидротехника. – 1986. – Вып. 43. – С. 70 – 73.

2. *Определение* коэффициента гидравлического трения в перфорированных сборных трубопроводах.//Гидравлика и гидротехника. – 1984. – Вып. 38. – С. 32 - 36.

3. *Спеціальні* питання гідравліки систем водопостачання і водовідведення. Навчальний посібник.– К.: ВІПОЛ, 1993. – 136 с.

Надійшло до редакції 22.05.2016

УДК 532.542

С.И. КРИЛЬ, доктор технических наук
В.П. БЕРМАН, доктор технических наук
Институт гидромеханики НАН Украины

О МЕТОДИКЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПУЛЬПОПРОВОДОВ, ПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ СЫПУЧИЕ МАТЕРИАЛЫ

Здійснено узагальнення раніше розробленої методики гідравлічного розрахунку пульпопроводів на випадок гідротранспортування важких дисперсних матеріалів густиною понад 8000 кг/м^3 . Наведено результати експериментальних досліджень гідротранспорту такого роду твердих матеріалів і показана цілком задовільна збіжність розрахункових значень основних параметрів гідротранспортування з дослідними даними.

Встановлено, що запропонована в даній роботі методика розрахунку прийнятна для широкого класу суспензій і різних умов транспортування, а також може служити основою для аеродинамічного розрахунку систем високонапірного і традиційного пневмотранспорту.

Ключові слова: важкий дисперсний матеріал, гідро – і пневмотранспорт, методика розрахунку.

Осуществлено обобщение ранее разработанной методики гидравлического расчета пульпопроводов на случай гидротранспортирования тяжелых дисперсных материалов плотностью более 8000 кг/м^3 . Приведены результаты экспериментальных

исследований гидротранспорта такого рода дисперсных материалов и показано вполне удовлетворительное совпадение расчетных значений основных параметров гидротранспортирования с опытными данными.

Установлено, что предложенная в данной работе методика расчета приемлема для широкого класса суспензий и разных условий гидротранспортирования, а также может служить основой для аэродинамического расчета систем высоконапорного и традиционного пневмотранспорта.

Ключевые слова: тяжелый дисперсный материал, гидро- и пневмотранспорт, методика расчета.

In this paper the attempt is given to summarize the previously developed method for calculation of the main parameters of traditional hydraulic transport for transportation suspensions with density of solids particles more than 800 kg/m^3 . The results are presented on experimental studies of such kind of dispersion material, and also quite good correlation between calculation and experimental data has been shown.

It is found that the proposed in this paper the method of calculation can be successfully applied for a wide class of suspensions and for different conditions of hydrotransportation, and this method can also serve as a base for aerodynamics calculations of the high-pressure and traditional pneumatic pipeline systems.

Key words: heavy dispersion material, hydraulic and pneumatic transport, method of calculation.

В настоящее время помимо уже решенных задач в области трубопроводного гидротранспорта твердых дисперсных материалов возникают принципиально новые научно-технические проблемы. Они связаны с вопросами практики, поэтому решение их имеет важное прикладное значение. Особенно большой интерес проявляется к проблеме трубопроводного гидротранспорта сверхтяжелых сыпучих материалов с плотностью частиц не менее 8000 кг/м^3 . Для проектирования такого рода гидротранспортных систем и обеспечения надежности и эффективности их работы необходима научно обоснованная инженерная методика гидравлического расчета этих систем, созданная на основе специальных теоретических и экспериментальных исследований.

Основными гидравлическими параметрами, которые необходимо определить при проектировании гидротранспортной системы, являются удельные потери напора на трение и критическая скорость гидротранспортирования. Для их расчетов появилось много различных и в большинстве своем эмпирических формул весьма ограниченной области применения. Ограниченность, а в некоторых случаях и недопустимо низкая степень точности предложенных формул и чрезвычайно большое разнообразие сыпучих материалов на практике не всегда позволяет выбрать

расчетную зависимость, соответствующую условиям данного объекта проектирования.

Как известно, удельные гидравлические сопротивления и критическая скорость гидротранспортирования тесно связаны с кинематической структурой потока. Следовательно, одним из перспективных путей создания научно обоснованной обобщенной методики гидравлического расчета пульпопроводов, пригодной для практического использования в широком диапазоне изменения условий гидротранспортирования, является установление связи вышеуказанных гидравлических параметров с полями осредненных концентраций и скоростей в напорных взвесенесущих потоках. Такой путь избран в [1]. В этой работе получила развитие общая теория турбулентных взвесенесущих потоков, построены на ее основе с учетом экспериментальных данных физические модели течения гидросмесей в трубах, получены полуэмпирические зависимости для определения полей концентрации взвеси и осредненных скоростей движения жидкой и твердой фаз, расходной объемной концентрации гидросмеси, а также связанных с этими полями удельных гидравлических сопротивлений и критической скорости гидротранспортирования.

Расчетные зависимости для удельных потерь напора на трение I и критической скорости гидротранспортирования $V_{кр}$, полученные в [1], имеют вид

$$I = \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\lambda}{(1-a)\omega^2} \frac{v^2}{2gD} + (\Delta_s - 1) S \frac{W_s}{v} (1-S)^n \varphi; \quad (1)$$

$$V_{кр} = \left(\frac{D}{D_*}\right)^m \alpha \frac{(Re_*^{1/8} + 0,791)V_f}{(Re_*^{1/8} + 0,791)\beta_*}; \quad (2)$$

$$V_f = 3,94 \left[\frac{k_0 \sigma (\Delta_s - 1) S_m h_{кр}}{1 + \alpha_{кр}} \right]^{4/7} \cdot \frac{(1 - a_{кр})^{5/7} g^{4/7} D_*^{5/7}}{((\rho_0/\rho)_{кр} (\Psi_0)_{кр})^{1/4} v^{1/7}}. \quad (3)$$

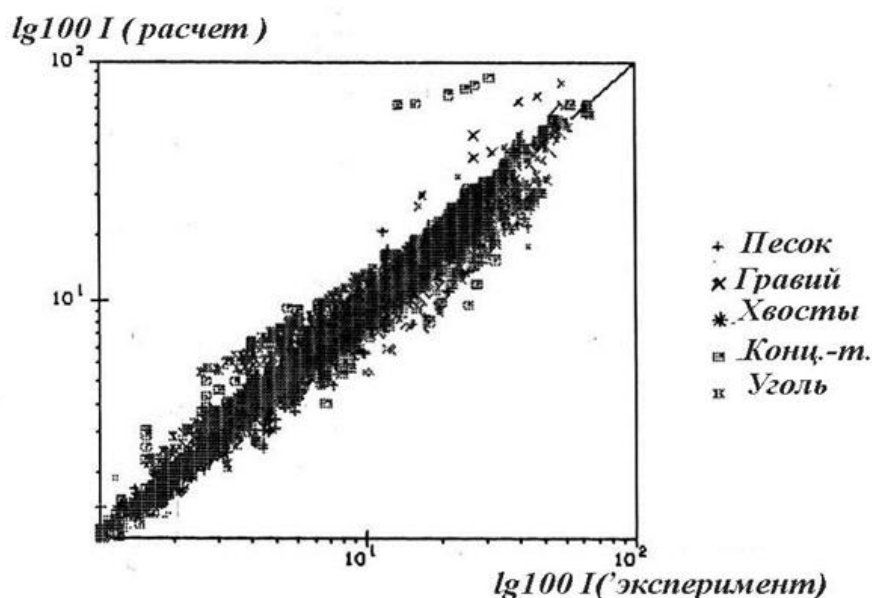
В уравнениях (1) – (3) приняты следующие обозначения: ρ_0 – средняя плотность гидросмеси у верхней стенки трубы; ρ – плотность несущей жидкости; λ – гидравлический коэффициент трения; a и ω – параметры, характеризующие асимметрию скоростного поля в потоке гидросмеси; n – полуэмпирический коэффициент (функция числа Рейнольдса для твердых частиц); V – средняя скорость потока; g – ускорение свободного падения; D – внутренний диаметр трубопровода; Δ_s – отношение плотности твердых частиц ρ_s к плотности несущей жидкости ρ ; W_s – средняя скорость осаждения твердых частиц; S – средняя объемная концентрация твердых частиц в потоке; φ – параметр, учитывающий неравномерность распределения концентрации по глубине потока; D_* – приведенный диаметр трубопровода; $D_* = 0,1\text{м}$; $Re_* = V_f D_* / \nu$ – число Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость несущей жидкости; k_0 – коэффициент трения скольжения твердых частиц о нижнюю стенку трубы; σ – параметр, учитывающий влияние мелких фракций на величину коэффициента k_0 ; S_m – предельно возможная объемная предельная концентрация твердых частиц в потоке; $h_{кр}$ – безразмерная толщина высококонцентрированного донного слоя твердых частиц в

критическом режиме гидротранспортирования; Ψ_0 – отношение вязкости гидросмеси к вязкости жидкости у верхней стенки трубы; $\alpha_{кр}$, β – коэффициенты, характеризующие смещение кинематической оси потока вверх по отношению к оси трубы в режиме критической скорости.

Формула (1), в сущности, представляет собой обобщенную формулу Дарси для напорных взвесенесущих потоков, которая не учитывает величину удельных гидравлических сопротивлений для потока воды, чем принципиально отличается по своей структуре от соответствующих формул, предложенных ранее другими авторами. Лишь в предельном случае, когда концентрация твердых частиц в потоке равна нулю, из (1) получается обычная формула Дарси для потока однородной жидкости. Характерной особенностью формулы (1), отличающих ее от формул других авторов, является и то, что она физически обоснованно связывает величину I с кинематикой взвесенесущего потока. Влияние твердых частиц на удельные потери напора на трение проявляется в основном через обобщенный параметр асимметрии скоростного поля $(1 - a)\omega^2$.

Что касается формулы (2), совместно с (3), то она описывает критический режим гидротранспортирования как граничный, разделяющий устойчивые (без заилиения) и неустойчивые (с заилиением) режимы движения гидросмесей по горизонтальным трубам. В критическом режиме должно выполняться предельное динамическое равновесие между потоком смеси в целом и сплошным потоком твердых частиц, перемещающихся у дна трубы. Формула (2) получена впервые, исходя из условия вышеуказанного динамического равновесия, чем и определяется ее физическая обоснованность. Влияние твердых частиц на величину $V_{кр}$ проявляется в основном через параметры k_0 , σ , Δ_s , $\alpha_{кр}$ и $h_{кр}$.

Для проверки достоверности формул (1) – (3) использован обширный экспериментальный материал по измерению удельных потерь напора на трение и критической скорости гидротранспортирования, полученный в результате лабораторных и натурных исследований гидротранспорта многих дисперсных твердых материалов в трубопроводах различных диаметров. Было использовано более 1000 экспериментальных данных, полученных отечественными и зарубежными авторами. При этом средняя крупность твердых частиц изменялась от 0,05 до 15,4 мм, а относительная плотность Δ_s – от 1,57 до 5,37. Проходной диаметр трубы изменялся в диапазоне 24...1000 мм. Средняя объемная концентрация гидросмеси равнялась 0,02...0,36, а средняя скорость потока изменялась от $V_{кр}$ до $2,5V_{кр}$ и больше. Выполненные в [1-3] многочисленные сравнения расчетных, полученных по (1)–(3), и экспериментальных значений удельных гидравлических сопротивлений и критической скорости гидротранспортирования показали вполне удовлетворительное соответствие между ними. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты сравнения, касающиеся удельных гидравлических сопротивлений.



Средняя квадратичная ошибка 20.16 %

Рис. 1. Сравнение экспериментальных и расчетных данных (логарифмические координаты)

В данном случае среднее квадратичное отклонение расчетных значений от опытных составляет 20,16%, включая погрешности измерений.

Кроме того, на рис. 2 и 3 показаны зависимости удельных гидравлических сопротивлений от средней скорости потока при различных объемных концентрациях гидросмеси и зависимости критической скорости и соответствующих ей удельных гидравлических сопротивлений от средней объемной концентрации для некоторых твердых материалов. На этих рисунках сплошные линии – расчет по методике [1], а точки – экспериментальные данные, заимствованные из соответствующих источников.

Таким образом, из приведенных результатов проверки достоверности формул (1)–(3) следует, что разработанная в [1] методика гидравлического расчета пульпопроводов приемлема для практического использования в широком диапазоне изменения условий гидротранспортирования. Поэтому имеются основания предположить, что эта методика расчета приемлема и для сверхтяжелых дисперсных материалов. Чтобы убедиться в правомерности данного предположения, желательно было бы проверить достоверность формул (1)–(3) на соответствующих данных для такого рода материалов. Поскольку такие данные нам неизвестны, для проведения экспериментов был изготовлен специальный стенд, оборудованный транспортным трубопроводом диаметром $D = 54$ мм. Схема экспериментального стенда приведена на рис. 4.

В качестве сверхтяжелого материала использовался мелкодисперсный медный порошок средней крупностью $d_s = 0,042$ мм и плотностью $\rho_s = 8777$ кг/м³.

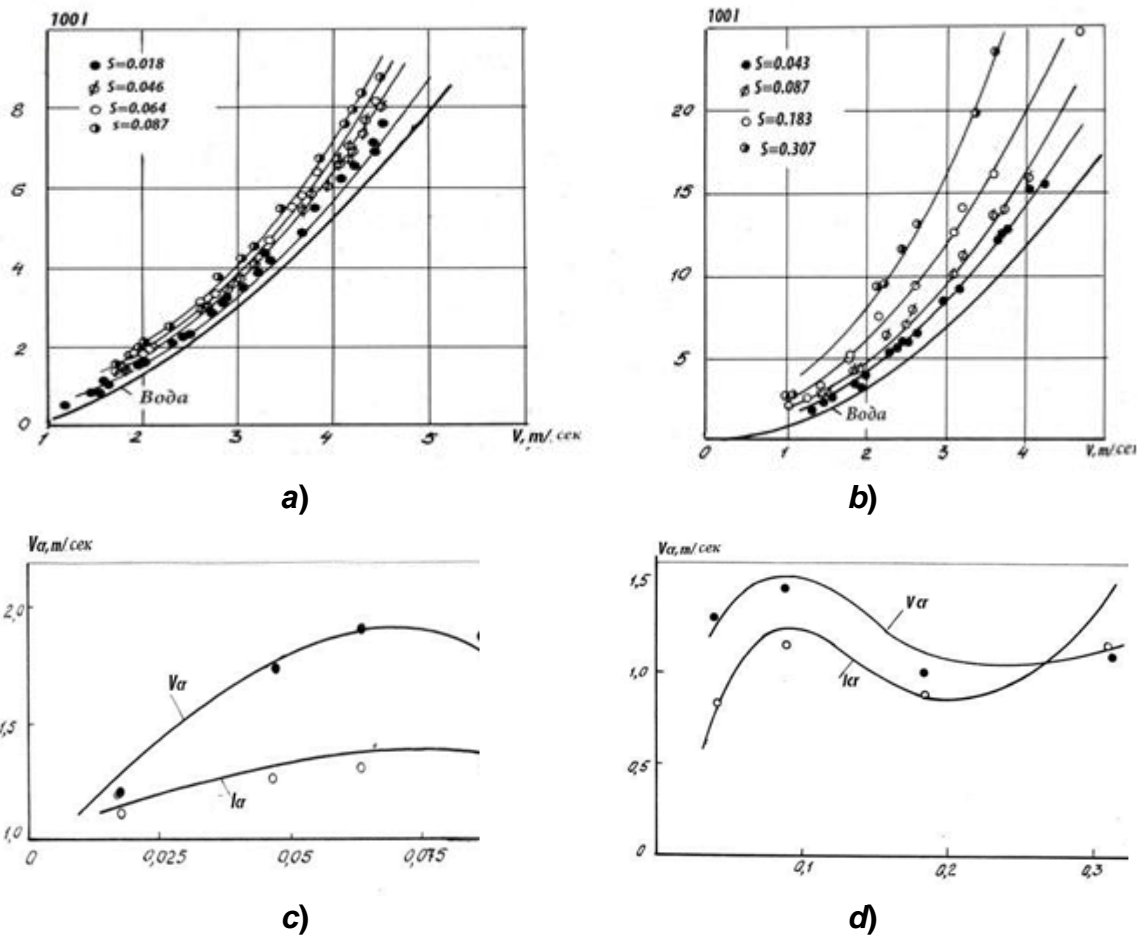
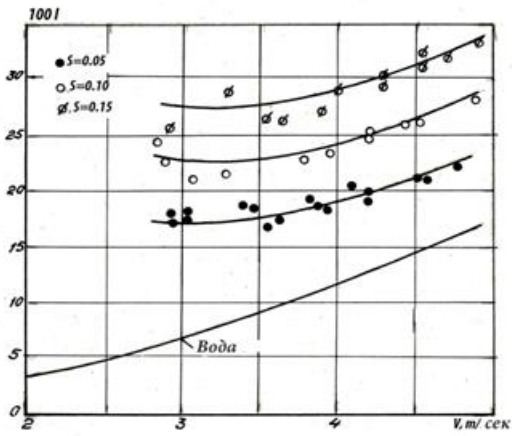


Рис. 2. Зависимости (a-b) удельных потерь на трение I от средней скорости гидросмеси V ; зависимости (c-d) критической скорости $V_{кр}$ и соответствующих потерь на трение $I_{кр}$ от средней объемной концентрации S при движении гидросмеси.

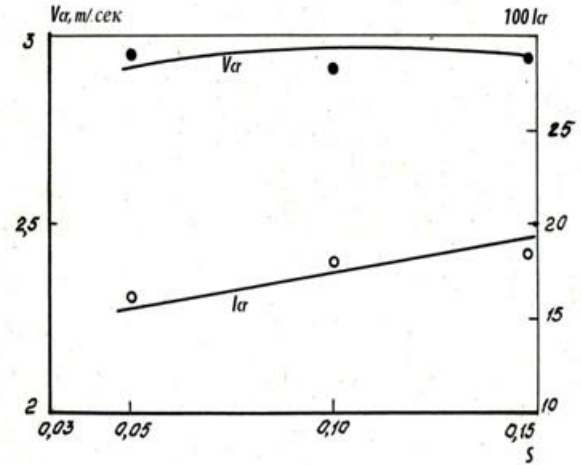
(a-c) – диаметр трубопровода $D = 206$ мм; (b-d) – диаметр трубопровода $D = 103$ мм. Материал – концентрат железной руды. $\rho_s = 4450$ кг/м³ и $d_s = 0,058$ мм; сплошные кривые – расчет, точки – экспериментальные значения [4]

Не останавливаясь на описании методики проведения исследований, отметим лишь, что эксперименты проводились в диапазоне изменения средней скорости потока $V_{кр} \leq V \leq 4$ м/с и средней объемной концентрации $0 \leq S \leq 0,37$. При этом особое внимание уделялось изучению критического режима гидротранспортирования как наиболее энергетически выгодного.

На рис. 5 показано графическое изображение зависимостей $I_{кр}$ и $V_{кр}$ от концентрации S , полученных экспериментально и расчетным путем в соответствии с методикой расчета [1]. Полученные результаты еще раз убеждают в достоверности и универсальности этой методики расчета.



a)



b)

Рис. 3. Зависимость (a) удельных потерь на трение I от средней скорости V и зависимость (b) критической скорости $V_{кр}$ и соответствующих потерь на трение $I_{кр}$ от средней объемной концентрации S при движении гидросмеси в трубопроводе $D = 103$ мм. Материал – окалина: $\rho_s = 5370$ кг/м³ и $d_s = 1,41$ мм; сплошные кривые – расчет, точки – экспериментальные значения [5].

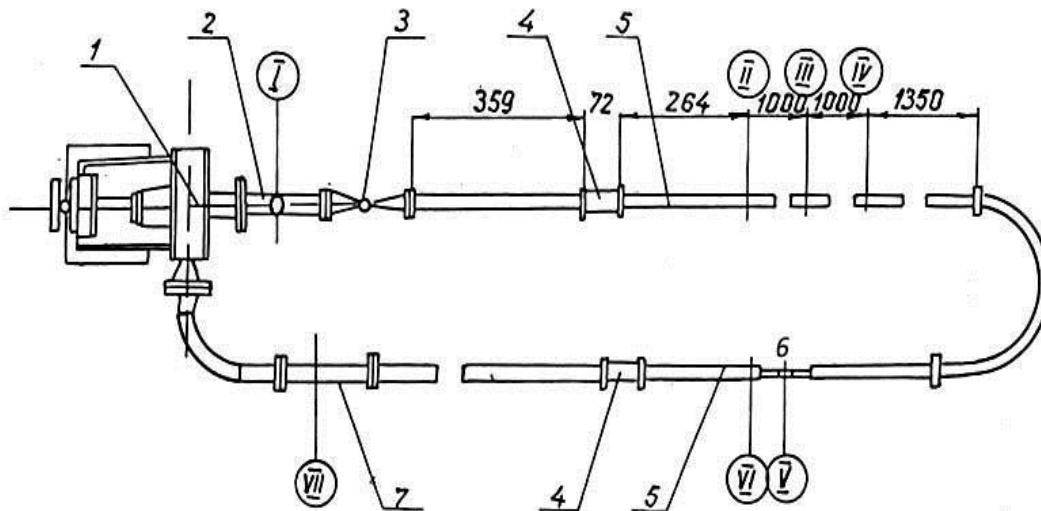


Рис. 4. Схема экспериментального стенда.

- 1 – загрузочный бункер; 2 – всасывающий патрубок насоса; 3 – кран переключатель; 4 – прозрачные вставки; 5 – транспортный трубопровод; 6 – измеритель расхода; 7 – вставка.

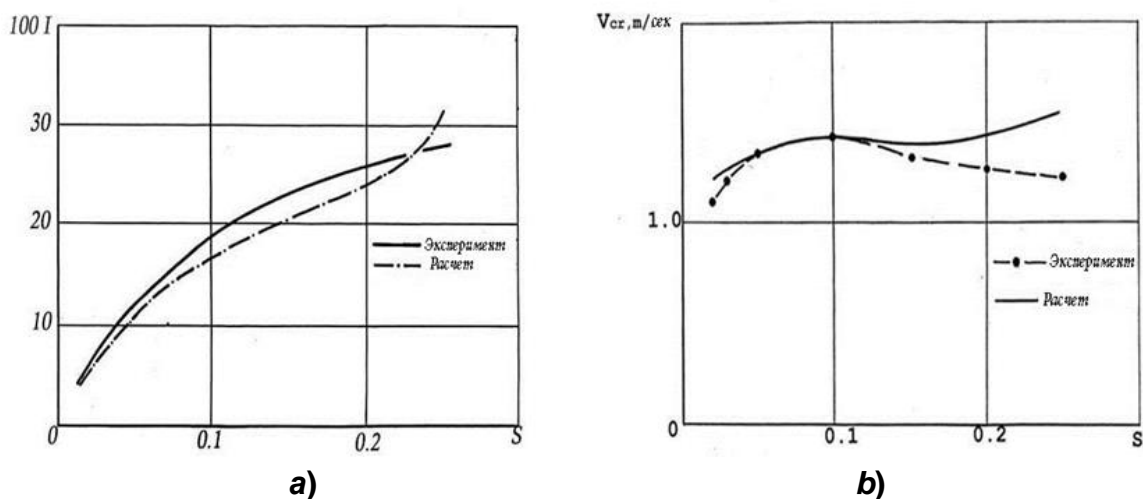


Рис. 5. Зависимость (а) – удельных гидравлических сопротивлений $I_{кр}$ и (б) – критической скорости $V_{кр}$ от концентрации S . Материал – медный порошок:
 $d_s = 0,042\text{мм}$ $\rho_s = 8777\text{кг/м}^3$

В ближайшей перспективе намечается провести аналогичные исследования с еще более тяжелым материалом, в частности, мелкозернистым вольфрамом плотностью $\rho_s = 19000\text{ кг/м}^3$.

Попутно отметим еще одну научно-техническую проблему развития трубопроводного транспорта твердых дисперсных материалов.

В настоящее время, в связи с обострившейся транспортной проблемой, многими специалистами обсуждается идея о возможности использования существующих газовых магистралей для пневмотранспорта угля и других дисперсных материалов в потоке различных газовых носителей.

Давление в таких системах может достигать порядка 100атм, а сам вид такого транспорта получил название – высоконапорный пневмотранспорт. Для создания такого рода пневмотранспортных систем необходимо предварительно решить целый комплекс задач, в том числе задачу, связанную с разработкой методики аэродинамического расчета этих систем. Тогда можно будет определить необходимые рабочие характеристики системы (массовый расход, давление, критическую скорость и пр.), что позволит уже на стадии проектирования оценить принципиальную возможность, перспективность и надежность внедрения такого способа транспортирования. Этот вид транспорта изучается на протяжении последних лет многими научными организациями, в том числе Институтом гидромеханики НАН Украины [6-8].

К настоящему времени нами разработаны численные алгоритмы решения задач высоконапорного пневмотранспорта. При этом было установлено, что для замыкания полученной системы дифференциальных уравнений неравномерного или неустановившегося напорного одномерного движения газозвеси при высоких давлениях необходимо в качестве отдельной подпрограммы разработать научно обоснованную методику

расчета основных параметров движения газозвеси в трубах без учета сжимаемости несущей среды. При этом была использована вышеизложенная методика расчета гидротранспорта, несмотря на то, что относительная плотность твердых частиц при высоконапорном пневмотранспорте на 2 порядка может превышать относительную плотность тех же твердых частиц при гидротранспорте.

Прямое доказательство того, насколько достоверной и обоснованной в данном случае будет разработанная методика расчета высоконапорного пневмотранспорта, является пока невозможным из-за отсутствия в настоящее время экспериментальных данных по этому виду транспорта. Тем не менее, говоря о приемлемости рассматриваемой методики расчета к высоконапорному пневмотранспорту, желательно предварительно проверить достоверность ее хотя бы на случай обычного пневмотранспорта при сравнительно небольших давлениях 5...10 атм, в области исследования которого уже разработаны методы расчета основных параметров пневмотранспортирования. Именно такой путь был избран нами для предварительной проверки достоверности методики расчета [1] в случае пневмотранспорта. Для заданного конкретного дисперсного материала расчетные значения параметров пневмотранспортирования, полученные по методике [1] сопоставлялись с соответствующими расчетными значениями, полученными по известным в литературе методикам расчета обычного пневмотранспорта [6-8].

Для определенности, в качестве дисперсного материала был выбран мелкозернистый уголь плотностью 1500 кг/м^3 и средней крупностью $d_s = 0,085 \text{ мм}$. В качестве примера результаты такой проверки представлены на рис. 6.

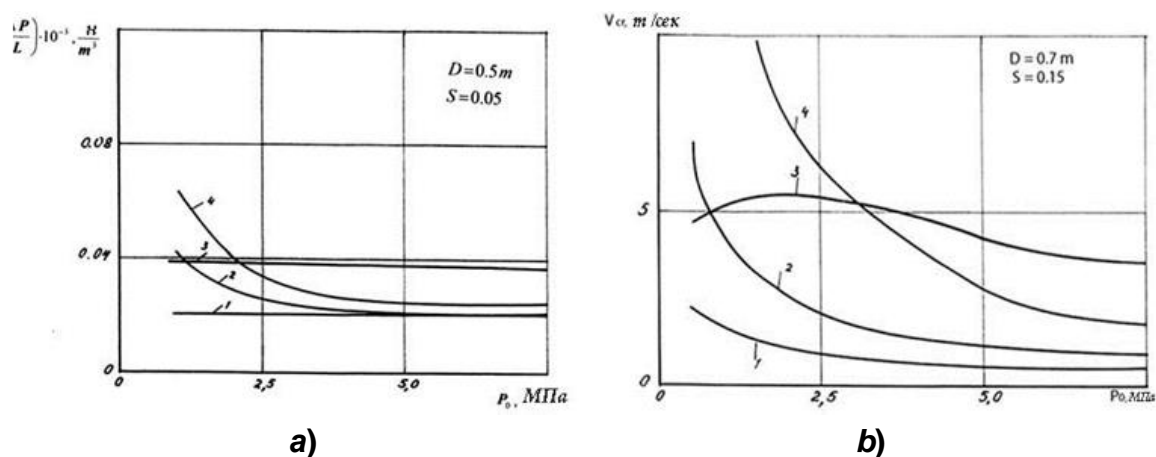


Рис. 6. Зависимость удельных гидравлических сопротивлений (а) и критической скорости пневмотранспортирования (б) от начального рабочего давления P_0 :

- (а) 1 – расчет согласно [9]; 2 – расчет согласно [12];
3 – наши расчеты; 4 – расчет согласно [11]
- (б) 1 - расчет согласно [10]; 2 – расчет согласно [9];
3 – наши расчеты; 4 – расчет согласно [11]

Как видно на этом рисунке, расчетные кривые удельных потерь давления и критической скорости пневмотранспортирования, полученные по методике [1], вполне удовлетворительно согласуются с соответствующими расчетными кривыми, полученными по известным методикам расчета пневмотранспорта при обычных давлениях. Следовательно, имеются основания полагать, что параметры пневмотранспортирования при сверхвысоких давлениях в первом приближении могут быть определены согласно предложенному нами алгоритму, в основу которого положена обобщенная методика расчета гидротранспорта [1].

Список литературы

1. *Криль С.И.* Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наукова Думка, 1990. – 159 с.
2. *Bournasky E., Berman V., Kril S.* Calculation of steady and transient slurry pipeline flow // *Water Problems*, № 28. – Bulgaria, Sofia, 1996. – P.59-66.
3. *Sobota J., Boczarski S., Kril S., Berman V.* Calculation principle of global parameters for pipeline hydrotransport. Part I // *Unified Experimental data and calculation methods of pipeline hydrotransport.* – *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniszej we Wroclawiu, Inzynieria Srodowiska VIII.* – 1996. – P.209-223.
4. *Коберник С.Г., Войтенко В.И.* Напорный гидротранспорт хвостов горнообогатительных комбинатов. – К.: Наук.думка, 1967. – 140 с.
5. *Разработать* методику гидравлического расчета комплекса узлов установки напорно-принудительного удаления окалины и транспортного трубопровода. // *Отчет Института гидромеханики АН УССР.* – К., 1979. – 64 с.
6. *Берман В.П., Орлова Л.С.* К вопросу о пневмотранспорте угля в магистральных газопровода // *Гидромеханика.* – К., 1993. – №67. – С.91-94.
7. *Kril S., Berman V.* Numerical Simulation of Flow of Suspensions of Matter in Gas in Pipes under High Pressures // *International Journal of Fluid Mechanics Research.* – Vol.23, 1996. – P.22-29.
8. *Kril S., Berman V.* Equations of Turbulent Gas/Solids Flow // *International Journal of Fluid Mechanics Research.* – Vol.27, № 1. – 2000. – P.43-55.
9. *Соловьев М.* К вопросу взвешивания и транспортирования зернистого материала в горизонтальном трубопроводе // *Инженерно-физический журнал*, т.VII. – М., 1970. – С.62-66.
10. *Сакс С.* Определение критической скорости взвесенесущего потока // *Инженерно-физический журнал*, т.XVIII. – №5. – М., 1970. – С.832-837.
11. *Смолдырев А.* Гидро- и пневмотранспорт // *Металлургия.* – М., 1975. – 384 с.
12. *Hydraulic and fluid mechanics* // *Proceeding of the First Australian Conference.* University of Western Australia, 1964. – 503 p.

Надійшло до редакції 13.04.2016

Наукове видання

**ПРОБЛЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ,
ВОДОВІДВЕДЕННЯ ТА ГІДРАВЛІКИ**

Науково-технічний збірник

Випуск 26

Коректура та комп'ютерна верстка *Аргатенко Т.В.*