

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ТРУБАХ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Слущкий Н.Г. (ХГЗ «Паллада», г. Херсон, Украина)

The research of hydraulic blow in pipes with different various rigidity during pneumotransport of some loose materials is carried out and theoretical dependences for definition of blow distribution speed and pressure are received.

Постановка задачи. Транспортирование твердых сыпучих материалов трубопроводным транспортом получило распространение в различных отраслях промышленности Украины и ряда зарубежных стран при погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работах. Одной из разновидностей трубопроводного транспорта являются пневматическое транспортирование (пневмотранспорт) сыпучих материалов [1 – 3].

Пневматическое транспортирование представляет собой процесс перемещения твердых частиц в смеси с воздухом, осуществляемый по трубам под действием перепада давлений. Принцип действия пневматических устройств трубопроводного транспорта основан на передаче энергии несущей среды частицам твердых сыпучих материалов для перемещения их по транспортным коммуникациям со сравнительно высокими скоростями, достигающими в системах 40...50 м/сек. Движение по трубам смеси материала с воздухом (аэросмеси) происходит под действием разности давлений, образуемой с помощью перекачивающих агрегатов – пневматических питателей в сочетании с воздуходувными машинами, а также вакуумных или струйных насосов и др. [4].

Известны преимущества пневматических устройств перед другими видами транспортного оборудования. Пневмотранспортные установки обеспечивают: возможность перемещения сыпучих материалов по сложной траектории; забор материала из средств их доставки и труднодоступных мест и выдачу его в различных точках; максимальное устранение потерь сыпучего материала; значительное сокращение трудоемкости погрузочно-разгрузочных работ; надежную защиту от атмосферных воздействий и создание необходимых санитарно-гигиенических условий труда для обслуживающего персонала. Обеспечивается защита окружающей среды от распыления транспортируемого сыпучего материала. Пневмотранспортные установки требуют относительно малых площадей для оборудования и трубопроводов, которые могут быть проложены с учетом любых местных условий производства, в том числе и в труднодоступных местах. Это оборудование отличается простотой эксплуатации, легкостью управления, возможностью автоматизации процессов транспортирования и использования дистанционного управления [1, 2, 4].

Наряду с указанными выше достоинствами, пневмотранспорту твердых сыпучих материалов присущи также и недостатки: относительно высокий удельный расход электроэнергии на тонну перемещаемого материала; возможность закупорки трубопроводов в процессе работы; значительный износ трубопроводов, соприкасающихся с транспортируемым материалом.

При пневматическом транспортировании твердых сыпучих материалов удельный расход электроэнергии и износ трубопровода, в значительной степени определяющие его технико-экономическую эффективность, зависят от принятого режима транспортирования (скорости движения аэросмеси и ее плотности). Минимальным затратам электроэнергии и минимальному износу трубопроводов соответствует минимально допустимая по условиям несущей способности потока

скорость движения аэросмеси (критическая скорость). Минимальным удельным энергозатратам соответствует также максимально возможная по условиям безаварийной работы системы (без закупорок трубопровода) плотность (концентрация) аэросмеси.

Вопросы повышения технико-экономической эффективности пневмотранспорта за счет создания и внедрения новых технологических схем и оборудования, увеличения срока службы трубопроводов и обеспечения безаварийной работы приобретают чрезвычайно важное значение. В этой связи исследование гидравлического удара в трубах, приводящего к закупорке трубопровода, и их износ при пневмотранспорте различных твердых абразивных сыпучих материалов является одной из актуальных задач внедрения этого вида транспортирования в судостроении.

Характеристики гидравлического удара в значительной мере зависят от конкретных условий его возникновения, поэтому проблема неустановившегося режима в высоконапорных пневмотранспортных системах при движении полифазного потока в настоящее время не может считаться решенной. Наличие значительной сложности пневмотранспортной системы (повороты, отводы, тупики и др.) создает порой большие трудности при ее расчете на гидравлический удар и проектировщики, как правило, не могут определить максимальные ударные давления. Явление гидравлического удара, сопровождающееся разрывом сплошности потока при ударе, не изучено не только для сложных систем, но и для простых трубопроводов. Совершенно не изучено явление неустановившегося движения при впуске воздуха и твердой фазы в замкнутую напорную систему и др. Исследования и рекомендации по расчету гидравлического удара в трубопроводах при пневматическом транспортировании полифазных потоков отсутствуют.

Целью настоящей работы является исследование гидравлического удара в трубах различной жесткости при пневмотранспорте сыпучих материалов и получение теоретических зависимостей для определения скорости распространения удара и возникающего при этом давления.

Изложение основного материала. Практика эксплуатации пневмотранспортных установок показала, что в процессе работы довольно часто возникают гидравлические удары, сопутствующие всем переходным режимам в системе трубопроводных установок и выражающиеся во внезапном повышении давления в транспортной среде. Они появляются в результате быстрой подачи сжатого воздуха и твердой фазы, прекращения их подачи в пневмотранспортную систему или изменения режима работы. Резкое изменение давления в этот период неустановившегося движения двухфазного потока способствует распространению ударной волны по трубе, что приводит к увеличению напряжения в материале трубопровода. Это, в свою очередь, влияет на выбор его материала, удовлетворяющего условиям прочности. При пневмотранспорте сыпучих материалов в плотном слое (с большой концентрацией твердой фазы) бывают случаи *закупорки трубопровода*. Это возникает, когда при недостаточной скорости транспортирования воздушный поток не в состоянии поднять и переместить во взвешенном состоянии транспортируемые тяжелые частицы, и они постепенно оседают, заполняя сечение трубы, и создают «пробку» в трубопроводе. В этом случае возникновение гидравлического удара является особо опасным.

Широкое применение в последние годы в судостроении пневмотранспорта сыпучих материалов [5 – 7] выдвинуло ряд требований, в частности, необходимость получения расчетных зависимостей и оценки величины гидравлического удара при движении полифазного потока, а также устойчивости материалопровода к явлениям

гидравлического удара разрушительной силы. В связи с этим автором были проведены теоретические исследования гидравлического удара в трубах из различных материалов при пневматическом транспортировании двухфазного потока.

Наиболее опасным является возникновение гидравлического удара при образовании закупорки трубопровода – появлении «пробки». Вблизи образованной «пробки» концентрация твердых частиц резко увеличивается. Однако этот случай является предельным и образование «пробки» происходит на очень коротком расстоянии, поэтому за расчетную можно принять первоначальную концентрацию твердых частиц. Принято допущение, что в трубе нет осадка и что все частицы твердой фазы взвешиваются потоком. Предположено, что вследствие быстрого закрытия трубопровода двухфазный поток останавливается, и эта остановка передается по трубе в виде ударной волны. При этом газообразная фаза сжимается, а стенки трубы расширяются. Для определения изменения давления, возникающего при ударе, рассмотрен участок трубы, охваченный ударной волной.

После резкого прекращения подачи сжатого воздуха движение двухфазного потока у закрытого сечения трубы прекратится и скорость потока упадет до нуля ($v_{cm} = 0$), вследствие чего возникнет удар. При этом ударная волна будет распространяться от закрытого сечения навстречу движению потока. За время Δt ударная волна пройдет некоторое расстояние Δl , ограниченное плоскостями А и В (рис.1). Это приведет к повышению давления на величину Δp на участке $\Delta l = u_{уд} \cdot \Delta t$. В результате распространения ударной волны стенки участка трубы, охваченного возмущением, будут деформироваться. Примем допущение, что в этот момент давление и скорость потока в сечении А остаются еще прежними и соответственно равными p и v_{cm} .

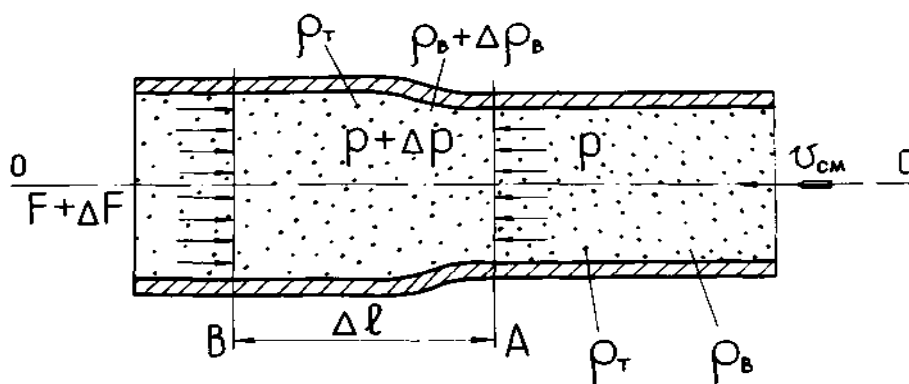


Рис.1. Влияние удара на размеры трубы и параметры двухфазного потока

К участку длиной Δl применена теорема количества движения в проекции на ось 0-0 трубы.

Импульс внешних сил

$$[F \cdot (p - \Delta p) - F_p] \cdot \Delta t = \Delta p \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения трубы.

Изменение количества движения массы двухфазного потока на участке Δl составит

$$[\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B] \cdot [F \cdot v_{cm} \cdot u_{yo} \cdot \Delta t + F \cdot v_{cm}^2 \cdot \Delta t], \quad (2)$$

где ρ_T, ρ_B – плотность твердых частиц и сжатого воздуха соответственно; ε – объемная доля твердых частиц в аэросмеси; $1-\varepsilon$ – объемная доля воздуха в аэросмеси; $\varepsilon\rho_T + (1-\varepsilon)\rho_B = \rho$ – плотность двухфазного потока; $u_{уд}$ – скорость распространения удара в двухфазном потоке.

Индексы «т» и «в» относятся соответственно к твердым частицам и воздуху. Вторым членом ($F \cdot v_{см}^2 \cdot \Delta t$) в выражении (2) можно пренебречь как пренебрежимо малой величиной по сравнению с первым членом.

Расчетные параметры гидравлического удара в трубах при движении двухфазного потока определены на основе результатов исследования однофазного потока Н.Е. Жуковским [8]. Для вывода дифференциальных уравнений гидравлического удара Н.Е. Жуковский применил теорему об изменении количества движения для массы жидкости, заключенной между двумя смежными перпендикулярными сечениями трубы.

В результате проведенных исследований получено выражение для определения скорости распространения удара $u_{уд}$ в стальной трубе в рассматриваемом двухфазном потоке

$$u_{уд} = \frac{\sqrt{\frac{E_B}{\rho_B}}}{\sqrt{\left(1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}}\right) + \varepsilon \cdot \left[\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot \left(\frac{\rho_T}{\rho_B} - 1\right) - 1\right]}}, \quad (3)$$

где D – внутренний диаметр трубы; δ – толщина стенки трубы; E_{TP} , E_B – модули упругости материала трубы и объемной упругости сжатого воздуха соответственно.

Рассмотрено несколько частных случаев выражения (3).

1. Поток движется в трубе бесконечной жесткости $\frac{D}{\delta} \cdot \frac{1}{E_{TP}} = 0$, объемная доля твердых частиц в аэросмеси $\varepsilon = 0$.

$$u_{уд} = u_{св} = \sqrt{\frac{E_B}{\rho_B}}, \quad (4)$$

где $u_{св}$ – скорость распространения звука в сжатом воздухе.

2. Поток движется в трубе конечной жесткости $\frac{D}{\delta} \cdot \frac{1}{E_{TP}} \neq 0$, $\varepsilon = 0$.

$$u_{уд} = u_{оф} = \frac{\sqrt{\frac{E_B}{\rho_B}}}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}}}} = \frac{u_{св}}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}}}}, \quad (5)$$

где $u_{оф}$ – скорость распространения звука в однофазном потоке.

3. Поток с большой концентрацией твердых частиц в трубе бесконечной жесткости $\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} = 0$, $0 < \varepsilon \ll 1$.

$$u_{y\partial} = u_{\partial\phi} = \frac{u_{CB}}{\sqrt{1-\varepsilon}}, \quad (6)$$

где $u_{\partial\phi}$ – скорость распространения звука в двухфазном потоке.

4. Поток с большой концентрацией твердых частиц движется в трубе конечной жесткости $\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \neq 0, 0 < \varepsilon \ll 1$.

$$u_{y\partial} = u'_{\partial\phi} = \frac{u_{CB}}{\sqrt{\left(1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}}\right) + \varepsilon \cdot \left[\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot \left(\frac{\rho_T}{\rho_B} - 1\right) - 1\right]}}, \quad (7)$$

5. Поток движется в трубе конечной жесткости $\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \neq 0, \varepsilon = 1$ (случай закупорки трубопровода)

$$u_{y\partial} = u_{T\phi} = \frac{u_{св}}{\sqrt{\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot \frac{\rho_T}{\rho_B}}} \quad (8)$$

где $u_{T\phi}$ – скорость распространения звука в твердой фазе.

6. Поток движется в трубе бесконечной жесткости $\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} = 0, \varepsilon = 1$ (случай закупорки трубопровода).

$$u_{y\partial} = u'_{T\phi} = \infty \quad (9)$$

Кроме этого происходящие в трубе процессы при движении двухфазного потока рассмотрены в несколько ином аспекте. Также считаем, что в горизонтальной трубе АВ длиной l и площадью живого сечения $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ происходит установившееся движение двухфазного потока со скоростью $v_{см}$ (рис. 2). С некоторого момента происходит нарушение установившегося режима движения потока путем закупорки трубопровода «пробкой» из твердых частиц, образовавшейся на конце А.

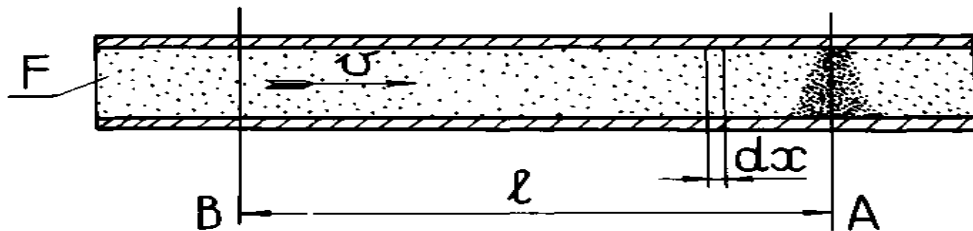


Рис. 2. Схема образования пробки (закупорки) в трубопроводе

При изменении режима движения потока по трубе единичные давления в очень близких друг к другу поперечных сечениях массы по тока в один и тот же момент

времени будут отличаться на величину $\frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx$. Здесь dx – расстояние между рассматриваемыми поперечными сечениями массы двухфазного потока. Элемент массы потока получит ускорение $\frac{dv_{cm}}{dt}$. Пользуясь принципом Даламбера, можно записать

$$\frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx \cdot F = \rho \cdot dx \cdot F \cdot \frac{dv_{cm}}{dt} \quad (10)$$

Или

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \cdot \frac{dv_{cm}}{dt} \quad (11)$$

Это уравнение упругого удара аналогично уравнению для однофазного потока.

Рассмотрен элемент трубы длиной dx . За время dt в этот элемент войдет масса потока, равная $\rho \cdot \left(v_{cm} + \frac{\partial v_{cm}}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot F \cdot dt$, а выйдет $\rho \cdot v_{cm} \cdot F \cdot dt$.

Приращение dM массы двухфазного потока в элементе трубы длиной dx будет

$$dM = \rho \cdot \left(\frac{\partial v_{cm}}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot F \cdot dt \quad (12)$$

В (12) плотность потока ρ представим через плотность твердой фазы ρ_T и сжатого воздуха ρ_B . Тогда

$$dM = [\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B] \cdot \left(\frac{\partial v_{cm}}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot F \cdot dt \quad (13)$$

Произведены следующие преобразования. Масса потока в элементе трубы определена из уравнения

$$M = \rho \cdot F \cdot dx \quad (14)$$

Приращение массы потока будет

$$dM = (F \cdot d\rho + \rho \cdot dF) \cdot dx \quad (15)$$

Воспользуемся принятым ранее допущением, что твердая фаза не деформируется,

$$d\rho = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B \quad (16)$$

После ряда преобразований выражение (3) примет вид

$$u_{y\partial} = \frac{u_{CB}}{\sqrt{\varepsilon \cdot \left[\left(\frac{u_{оф}}{u_{T\Phi}} \right)^2 - 1 \right] + \frac{\rho_B}{\rho_T} \cdot \left(\frac{u_{оф}}{u_{T\Phi}} \right)^2 + \left(\frac{u_{оф}}{u_{T\Phi}} \right)^2}} \quad (17)$$

Анализ полученного уравнения (17) показывает, что скорость распространения

удара при пневматическом транспортировании (случай двухфазного потока) зависит от скорости распространения звука в однофазном потоке $u_{\text{оф}}$ и твердой фазы $u_{\text{тф}}$, а также от объемной концентрации твердых частиц в аэросмеси ε .

При пневмотранспорте сыпучих материалов практический интерес представляют рассмотренные случаи 3 и 4. В качестве материалопровода в применяемых в судостроении промышленных установок пневматического транспортирования обычно используют стальные трубы или трубы из неметаллических материалов (напорные резино-тканевые рукава, полиэтиленовые или винипластовые трубы) [5]. Стальные трубы могут иметь конечную или бесконечную жесткость. Возникновение гидравлического удара в трубах из неметаллических материалов рассмотрено ниже. Случаи 5 и 6 являются чисто теоретическими, поскольку ε не может быть больше объемной доли сыпучего материала в естественной насыпи, а эта величина всегда меньше единицы. Рассмотренный случай 5 дает возможность определить $u_{\text{тф}}$.

В действующих пневмотранспортных установках трубопроводы изготавливаются из толстостенных труб $\left(\frac{\delta}{D} > \frac{1}{20}\right)$. При расчете гидравлического удара в таких трубах в формулы для определения скорости распространения волны рекомендуется вводить не действительную толщину δ стенки трубы, а приведенную $\delta_{\text{пр}}$. Определена $\delta_{\text{пр}}$, т.е. найдено значение некоторой толщины тонкостенной трубы, при которой ее деформация будет равна деформации работающей толстостенной трубы. Величина деформации тонкостенной трубы определена из соотношения

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta p \cdot D}{2\delta \cdot E_{\text{тр}}} \quad (18)$$

Величина деформации толстостенной изотропной трубы, не закрепленной по торцам, по Г. Ламе будет

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta p}{E_{\text{тр}}} \cdot \left(\frac{D_H^2 + D^2}{D_H^2 - D^2} + \mu^* \right) \quad (19)$$

где D_H – наружный диаметр трубы; μ^* – коэффициент Пуассона материала трубы (для стали $\mu^* = 0,3$).

Для определения приведенной толщины трубы решим совместно (18), (19) и введем поправочный коэффициент φ , учитывающий изменение относительной толщины стенки и физико-механических свойств материала трубы,

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{D_H - D}{2\varphi}, \quad (20)$$

где

$$\varphi = \frac{D_H - D}{D} \cdot \left(\frac{D_H^2 + D^2}{D_H^2 - D^2} + \mu^* \right). \quad (21)$$

Все применяемые неметаллические материалы для изготовления пневмотранспортных трубопроводов являются упруго-вязкими материалами. Расчет гидравлического удара в таких трубопроводах также может выполняться по полученным выше формулам. Однако в эти формулы необходимо ввести поправочные величины, учитывающие затухание колебаний двухфазного потока вследствие вязкости

материала трубы.

При распространении упругих возмущений в двухфазном потоке, движущемся в трубопроводе из упруго-вязкого материала, происходит совместные колебания стенок трубы и потока. При этом наблюдается затухание колебаний вследствие внутреннего трения в материале трубопровода. Величина $u_{y\partial}$, будет уменьшаться за счет изменения E_{TP} .

Получена формула для определения скорости распространения ударной волны $u_{y\partial}$ при движении двухфазного потока в трубопроводе из упруго-вязкого материала

$$u_{y\partial} = \frac{u_{св}}{\sqrt{\left[1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot (1 - 2\mu^*)\right] + \varepsilon \cdot \left[\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot (1 - 2\mu^*) \cdot \left(\frac{\rho_T}{\rho_B} - 1\right) - 1\right]}}. \quad (22)$$

Формула (22) отличается от аналогичной (3) наличием поправочного коэффициента $(1 - 2\mu^*)$ при E_{TP} .

Рассмотрим три частных случая выражения (22) при движении двухфазного потока в трубопроводе из упруго-вязкого материала.

1. Объемная доля твердых частиц в аэросмеси $\varepsilon = 0$

$$u_{y\partial}^* = u_{оф}^* = \frac{u_{св}}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot (1 - 2\mu^*)}}, \quad (23)$$

где $u_{оф}^*$ – скорость распространения звука в однофазном потоке.

2. Поток движется с большой концентрацией твердых частиц $0 < \varepsilon \ll 1$

$$u_{y\partial}^* = u_{сф}^* = \frac{u_{св}}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot (1 - 2\mu^*) + \left[\frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot (1 - 2\mu^*) \cdot \left(\frac{\rho_T}{\rho_B} - 1\right)\right]}}, \quad (24)$$

где $u_{сф}^*$ – скорость распространения звука в двухфазном потоке.

3. Закупорка трубопровода $\varepsilon = 1$

$$u_{y\partial}^* = u_{тф}^* = \frac{u_{св}}{\sqrt{\frac{\rho_T}{\rho_B} \cdot \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_B}{E_{TP}} \cdot (1 - 2\mu^*)}}, \quad (25)$$

где $u_{тф}^*$ – скорость распространения звука в твердой фазе.

Практический интерес представляет рассмотренный случай 2. Проведен ряд преобразований с учетом поправочного коэффициента $(1 - 2\mu^*)$ при E_{TP} . После этого формула для определении $u_{уф}^*$, примет вид, подобный (17)

$$u_{уд}^* = \frac{u_{CB}}{\sqrt{\varepsilon \cdot \left[\left(\frac{u_{оф}^*}{u_{ТФ}^*} \right)^2 - 1 \right] + \frac{\rho_B}{\rho_T} \cdot \left(\frac{u_{оф}^*}{u_{ТФ}^*} \right)^2 + \left(\frac{u_{оф}^*}{u_{CB}^*} \right)^2}}. \quad (26)$$

При исследовании гидравлического удара, возникающего в трубопроводах при пневмотранспорте сыпучих материалов, следует анализировать уравнения (3), (17) или (22), (26), характеризующие удар в двухфазном потоке. С целью анализа этих уравнений было просчитано большое число самых различных вариантов при изменяющихся параметрах среды (давление, температура воздуха, скорость звука в сжатом воздухе и др.).

Приращение давления в трубе в случае гидравлического удара будет равно

$$\Delta p = v_{см} \cdot u_{уд} \cdot \rho_{см}, \quad (27)$$

где $\rho_{см}$ – плотность двухфазного потока в момент удара.

Изменение параметров движения двухфазного потока определено для случая пневматического транспортирования четырех различных сыпучих материалов (цемент, песок для строительных работ, гравий керамзитовый, щебень гранитный).

Выводы. Полученные теоретические зависимости и выполненные расчеты показали, что присутствие твердых частиц оказывает существенное влияние на гидродинамические характеристики потока. Несмотря на то, что при различной

объемной концентрации твердых частиц ε отношение $\frac{u_{сф}}{u_{оф}}$ во всех рассмотренных случаях для стальных трубопроводов близко к единице, а для резино-тканевых рукавов даже 0,5...0,8, при гидравлическом ударе наблюдается значительное повышение давления. Основное влияние на увеличение давления в трубах оказывает плотность и концентрация твердой фазы. Применение труб из упруго-вязких материалов для пневмотранспортных трубопроводов способствует снижению удара в 1,5...2 раза по сравнению со стальными трубами.

Список литературы: 1. Успенский В.А. Пневматический транспорт. – М.: Углетехиздат, 1989. – 283 с. 2. Урбан Я. Пневматический транспорт (перевод с чешского) – М.: Машиностроение, 1987. – 312 с. 3. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт (элементы теории и основы расчета) – М.: Изд-во «Недра», 1980. – 343 с. 4. Пневмотранспортное оборудование: Справочник / М.П. Калинушкин, М.А. Копель, В.С. Серяков, М.М. Шапунов. Под. общ. ред. М.П. Калинушкина. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 286 с. 5. Слуцкий Н.Г. Разработка технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы // 3б. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – № 3 (414). – С. 3–10. 6. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков / А.С. Рашковский, Н.Г. Слуцкий и др.; Под науч. ред. А.С.Рашковского: Монография. – Николаев: НУК: РАЛ-полиграфия, 2008 – 614 с. 7. Слуцкий Н.Г. Новые направления в проектировании и технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы // Материалы научного симпозиума «Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации судов». Том 1. Транспорт. – Одесса: Черноморье, 2008. – С. 18–23. 8. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – М.: Гостехиздат, 1949. – Собрание сочинений, Т. III. – 158 с.

Сдано в редакцию 20.01.2009