

Д-р техн. наук Е.В. Семененко  
(ИГТМ НАН Украины),  
ст. преп. Л.Г. Татарко  
(ДГХТУ МОН Украины)

## **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Проаналізовано можливість застосування відомих методик розрахунку критичної швидкості та гідравлічного ухилу при гідротранспортуванні сипких матеріалів по полімерних трубопроводах. Визначено необхідні заходи для адаптації відомих методик розрахунку для цього типу трубопроводів та наведено приклад такої адаптації для методики А.Є. Смолдирєва.

## **CALCULATION OF HYDROTRANSPORT PARAMETERS WHEN USING POLYETHYLENE PIPELINES**

The possibility of use of well-known calculation procedures of critical velocity and hydraulic gradient for hydrotransportation of bulk solids by polymeric pipelines was analysed. The required measures for well-known calculation procedures adaptation for pipelines of this type are determined and the example of such adaptation for A. Smoldirev calculation procedure is given.

На обогатительных фабриках горно-обогатительных комбинатов (ГОК) Украины отходы обогащения отводятся посредством напорных гидротранспортных комплексов, а на таких предприятиях, как Вольногорский горно-металлургический комбинат (ВГМК) и Иршанский ГОК напорные гидротранспортные комплексы используются и для доставки исходных песков на обогатительные фабрики [1 – 4]. Кроме того, известны примеры применения этого вида транспорта при разработке техногенных месторождений, когда лежалые отходы из хранилища подаются на повторное обогащение. Такое широкое применение трубопроводного гидротранспорта на предприятиях горнорудной промышленности обусловлено характером транспортируемых сред, технологической совместимостью и его преимуществами в данных условиях над другими видами транспорта: конвейерным, автомобильным и железнодорожным [1, 2, 5 – 10].

Опыт эксплуатации украинских и зарубежных обогатительных фабрик показывает, что за время их работы протяженность магистралей гидротранспортных комплексов, обеспечивающих доставку перерабатываемого сырья и отведение отходов обогатительного производства, постоянно увеличивается [1, 2, 4]. По мере отработки месторождения фронт горных работ и места складирования отходов удаляются от обогатительных фабрик, что требует перемещения насосной станции и увеличения длины трубопроводов.

Периодическое удлинение трубопровода гидротранспортного комплекса без установки дополнительных насосов или увеличения диаметров рабочих колес ограничено из-за возникновения критических режимов течения, которые резко снижают эффективность и надежность гидротранспортирования [1 – 4].

Например, опыт эксплуатации карьерного гидротранспортного комплекса ВГМК показывает, что зачастую для обеспечения сверхкритических режимов работы после удлинения трубопровода необходима меньшая мощность, чем

мощность еще одного насоса, а заменить существующие рабочие колеса рабочими колесами с большим диаметром невозможно [1, 2, 4]. В этом случае установка еще одного насоса значительно увеличивает капитальные затраты и энергоемкость гидротранспортирования, а также интенсифицирует износ трубопроводов, запорной арматуры и проточных частей других насосов. Кроме того, из-за нестабильности параметров транспортируемого материала карьерный гидротранспортный комплекс после удлинения трубопровода может периодически работать то в сверхкритических режимах, то в режимах с частичным заилением трубопровода, что снижает эффективность функционирования всей технологической цепочки от узла пульпообразования в карьере до батареи гидроциклонов на обогатительной фабрике.

В такой ситуации необходимо обеспечить регламентированную производительность гидротранспортного комплекса со скоростями, превышающими критическую. Это может быть достигнуто или повышением мощности используемых насосов, или снижением гидравлического сопротивления магистрали.

Данная проблема актуальна и очень важна с практической точки зрения. С одной стороны, план разработки месторождений и введения в эксплуатацию новых карт намыва хранилищ отходов определяется с учетом экономических, горно-геологических и экологических факторов, а поэтому в принципе не может учитывать режимы работы гидротранспортных комплексов. С другой стороны, важность ресурсо- и энергосбережения на предприятиях горнорудной промышленности регламентируется рядом государственных и региональных программ, а также ограничениями на электроэнергию, энергоносители и основной экологический ресурс – воду.

Вопрос снижения гидравлических сопротивлений при течении гидросмеси и воды рассматривался в работах отечественных и зарубежных специалистов [1, 4 – 12]. Анализ результатов этих исследований позволил выделить следующие методы, которые могут быть применены для условий гидротранспорта: наложение на поток продольных пульсаций скорости [6]; покрытие внутренней поверхности труб материалом с низким коэффициентом трения [3, 5, 7]; добавление в транспортируемую среду поверхностно активных или гидродинамически активных веществ [10, 11]; использование дополнительных струйных насосов [3, 8, 9].

По мнению авторов, для гидротранспортных комплексов наиболее перспективными являются методы снижения гидравлических сопротивлений не за счет покрытия внутренней поверхности трубы материалом с низким коэффициентом трения, а путем замены стальных труб на полиэтиленовые, так как развитие отечественной и зарубежной промышленности за последние годы позволило существенно продвинуться в создании труб и запорной арматуры из полимерных материалов. Появилась возможность использовать полиэтиленовые трубы вместо стальных не только для подачи питьевой и технической воды, но и для гидротранспортирования исходных песков на обогатительное производство, а также для отведения отходов их переработки.

Возможность этого была впервые доказана экспериментальным путем в условиях гидротранспортного комплекса ВГМК, когда в апреле 2006 года был

введен в эксплуатацию опытный участок полиэтиленовой трубы длиной 160 м, смонтированный на рабочем трубопроводе [13, 14]. Применена труба ПЭ 80 SDR 21 диаметром 630 мм с толщиной стенки 30 мм, рассчитанная на рабочее давление до 6 атм. По состоянию на конец 2006 года трубопровод отработал более 3500 часов, подано более 2 млн м<sup>3</sup> рудных песков. Плотность пульпы в зависимости от режима работы гидротранспортного комплекса изменялась от 1,01 до 1,22 т/м<sup>3</sup>. При осмотре внутренней части трубы замечен износ только выступающей части сварочного шва. Внутренняя часть трубы практически вся гладкая, небольшая шероховатость заметна только в нижней части трубы в пределах от 200 до 300 мм по дуге. Замер толщины трубы ультразвуковым переносным прибором показал износ не более 1,5 мм. Окончательный вывод об износостойкости полиэтиленовых труб делать еще рано. Но учитывая то, что стоимость стальных труб сегодня практически сравнялась со стоимостью полиэтиленовых труб с рабочим давлением до 6 атм., можно предположить, что применение полиэтиленовых труб на тех участках трубопровода, где рабочее давление не превышает 6 атм., экономически выгодней, чем применение стальных труб.

Однако расчет гидравлического сопротивления таких труб затруднен из-за отсутствия данных о зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса, методик расчета критических скоростей гидротранспортирования и дополнительных гидравлических уклонов, обусловленных присутствием твердых частиц. Отечественные производители полиэтиленовых труб не располагают такими данными, а зарубежные или приводят номограммы с диапазонами расходов, не характерными для гидротранспортных комплексов ГОКов, или указывают, что коэффициент гидравлического сопротивления для полиэтиленовых труб в 100, а то и в 1000 раз меньше, чем для чугунных.

Не намного лучше изучена зависимость гидравлического уклона от скорости при течении воды в полиэтиленовых трубопроводах [12 – 15]. Некоторые авторы приводят близкие формулы, которые можно обобщить в одну, однако использовать их для расчета параметров гидротранспорта затруднительно, так как эти методики не учитывают изменение вязкости несущей жидкости и влияние шероховатости стенки трубопровода, которая изменяется в процессе эксплуатации; предназначены для расчета гидравлических уклонов несущей жидкости и не могут быть применены для расчета дополнительных гидравлических уклонов, обусловленных присутствием в потоке твердых частиц; не позволяют рассчитать критическую скорость гидротранспортирования.

Цель статьи – на основании известных методов расчета параметров гидротранспорта в стальных трубопроводах разработать и обосновать научный подход расчета критической скорости и гидравлического уклона в полиэтиленовом трубопроводе с учетом изменения шероховатости внутренней стенки трубы.

Известные методики расчета гидравлического уклона при течении воды в полиэтиленовых трубопроводах (ISO TR 10501, СНиП 2.04.02-84, СП 40-102-2000) рекомендуют формулы, которые можно обобщить в одну вида [12 – 15]

$$i_0 = K \frac{V^n}{D^m}, \quad (1)$$

где  $i_0$  – гидравлический уклон, м вод. ст./м;  $V$  – средняя скорость воды, м/с;  $D$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $K$ ,  $n$  и  $m$  – эмпирические константы, средние значения которых можно принимать равными  $K = 0,000565$ ,  $n = 1,771$ ,  $m = 1,223$ .

Так как авторы не объясняют структуру коэффициента  $K$ , то невозможно установить, что он учитывает. Это, в свою очередь, не позволяет с достаточной уверенностью применять формулы вида (1) для расчета потерь напора, обусловленных движением несущей жидкости. Для полиэтиленовых и поливинилхлоридных труб, согласно рекомендациям отечественных специалистов, может быть использована следующая формула [4, 12]:

$$\lambda = \frac{0.288}{\text{Re}^{0.226}}; \quad \text{Re} = \frac{VD}{\nu_0}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса;  $\nu_0$  – кинематический коэффициент вязкости воды, м<sup>2</sup>/с.

Специалисты ИГТМ в результате математической обработки номограмм фирмы Wavin для труб ПЭ 80, ПЭ 100 и ПВХ с диаметрами от 50 до 630 мм и номинальным давлением 6, 10 и 16 атм. для расходов от 0,1 до 1000 л/с рекомендуют определять коэффициент гидравлического сопротивления по формуле [4, 13, 14]

$$\lambda = \frac{0.0784}{\text{Re}^{0.1158}} \quad (3)$$

Формулы (2), в отличие от выражения (1), в явном виде учитывают вязкость и плотность континуума и поэтому могут быть использованы для расчета гидравлического уклона при течении несущей жидкости – суспензии из воды и глинистых частиц. Из сравнения коэффициентов гидравлического сопротивления, рассчитанных по формуле (3) для стальных и полиэтиленовых труб, следует, что в рассматриваемом диапазоне расходов эта величина для стальных труб в среднем в 4,29 раза (от 3,99 до 4,51) или на 76,68% (от 74,93 до 77,81%) больше, чем для полиэтиленовых труб [4].

На основании выражений (2) и (3) можно предположить, что для получения формулы (1) использовались следующие зависимости:

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}^B}; \quad i_0 = \lambda \frac{\rho_0 V^2}{2gD}; \quad \text{Re} = \frac{VD}{\nu_0}.$$

Тогда коэффициенты в формуле (1) могут быть определены так:

$$K = \frac{A\rho_0 v_0^B}{2g}; \quad n = 2 - B; \quad m = B + 1,$$

а отличие плотности и вязкости несущей жидкости от воды может быть учтено следующим образом:

$$K = K_0 \frac{\rho}{\rho_0} \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^{2-n},$$

где  $K$  – значение коэффициента при течении несущей жидкости;  $K_0$  – значение коэффициента при течении воды;  $\rho$  – плотность несущей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости несущей жидкости, м<sup>2</sup>/с.

В этом случае величины  $n$  и  $m$  взаимосвязаны, и между ними должна существовать линейная связь  $n = 3 - m$ , что подтверждается рекомендованными в ISO TR 10501, СНиП 2.04.02-84, СП 40-102-2000 значениями.

Таким образом, вероятно, имеет смысл для расчета величины  $\lambda$  при напорном гидротранспорте в полиэтиленовых трубах использовать формулу, рекомендованную специалистами Института гидромеханики НАН Украины для условий гидротранспорта песчаных смесей по стальным трубопроводам [8, 9, 16 – 18]

$$\lambda = \frac{a}{(\lg \text{Re} - b_{\Delta})^2}, \quad (4)$$

где  $a$  – экспериментальная константа;  $b_{\Delta}$  – коэффициент, учитывающий состояние внутренней поверхности трубопровода.

Возможность использования формулы (4) при расчетах величины  $\lambda$  для полиэтиленовых труб обосновывается тем, что при гидротранспортировании сыпучих материалов полиэтиленовые трубы, как и стальные, являются гидравлически гладкими [8, 9, 16 – 18].

Опыт эксплуатации стальных труб для гидротранспорта россыпей, концентратов руд и отходов обогащения показывает, что внутренняя поверхность труб шлифуется транспортируемым материалом, и уже через 100 часов работы эти трубы можно считать гидравлически гладкими и вычислять для них коэффициент гидравлического сопротивления по формуле (4) [8, 9]. Полиэтиленовые трубы, как доказано в работах [19], могут считаться гладкими из-за малой шероховатости внутренней поверхности.

При этом формула (4) с помощью коэффициента  $b_{\Delta}$ , если известна его зависимость от шероховатости, может учитывать изменения величины  $\lambda$  как при шлифовании стальных труб, так и при увеличении шероховатости труб из полиэтилена. С использованием формулы (4) гидравлический уклон при течении несущей жидкости можно вычислить по формуле

$$i_0 = \frac{a}{(\lg \text{Re} - b_\Delta)^2} \frac{V^2}{2gD} \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (5)$$

При расчетах по формуле (5) изменение вязкости несущей жидкости по сравнению с вязкостью воды учитывается критерием Рейнольдса.

Возможность определения остальных параметров гидротранспорта в полиэтиленовых трубопроводах зависит от используемой методики расчета, которые условно можно разделить на три группы [1 – 3, 5 – 9, 16 – 18, 20].

В методиках первой группы для расчета параметров гидротранспорта используются осредненные характеристики транспортируемого материала, а критическую скорость определяют как решение нелинейного уравнения. Наиболее известными методиками этого типа являются методики С.И. Крыля и Ю.К. Витошкина. Расчет критической скорости и полного гидравлического уклона по этим алгоритмам требует данных о кинематической структуре потока в трубопроводе, а также знания зависимости коэффициента трения частиц о дно трубопровода в критическом режиме. Однако эти данные получены только для потоков гидросмеси в стальных трубопроводах [8, 9, 16, 18].

Ко второй группе можно отнести алгоритмы расчета параметров гидротранспорта по осредненным характеристикам транспортируемого материала, в которых используются эмпирические зависимости для определения критической скорости гидротранспортирования. Наиболее известными методиками этого типа являются методики А.П. Юфина, С.Г. Коберника и В.И. Войтенко, В.М. Карасика. Однако без усовершенствования ни одна из них не может быть использована для расчета параметров течения в полиэтиленовом трубопроводе.

Обобщая работы многих авторов, Н.А. Силин получил универсальные формулы для расчета параметров гидротранспорта в шлифованных и шероховатых трубах на основе их значений в критическом режиме [8, 9, 16]. Для шлифованных труб это зависимость вида

$$i = \frac{i_{\min}}{3-n} \left[ \frac{\lambda}{\lambda_{\min}} \left( \frac{V}{V_{\min}} \right)^2 + (2+n) \frac{V_{\min}}{V} \right]; \quad \lambda = \frac{B}{\text{Re}^n}, \quad (6)$$

а для шероховатых труб

$$i = \frac{i_{\min}}{3} \left[ \left( \frac{V}{V_{\min}} \right)^2 + 2 \frac{V_{\min}}{V} \right]; \quad (7)$$

$$i_{\min} = \lambda_{\min} \left( 1 + 2,5 \cdot \sqrt[6]{\frac{C}{Ar}} \right) \frac{V_{\min}^2}{2gD}; \quad V_{\min} = 0,8 V_{\text{кр}} \sqrt[12]{\frac{C}{D}}; \quad Ar = \frac{\rho_{\text{т}} - \rho_0}{\rho_0},$$

где  $i$  – гидравлический уклон;  $\lambda$  и  $\lambda_{\min}$  – коэффициенты гидравлических сопротивлений при движении чистой воды со средними скоростями  $V$  и  $V_{\min}$  соот-

ветственно;  $C$  – объемная концентрация пульпы, д. ед.;  $V_{\min}$  – скорость, при которой гидравлические сопротивления минимальны, м/с;  $Ar$  – параметр Архимеда;  $\rho_T$  – плотность частиц транспортируемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $i_{\min}$  – минимальные гидравлические сопротивления, м вод. ст.

Преимуществом выражений (6) и (7) является их универсальность, а также возможность использования формулы вида (1). Однако эта методика не позволяет определить критическую скорость гидротранспортирования в полиэтиленовых трубах.

Методика В.М. Карасика [9] при расчете параметров гидротранспорта в полиэтиленовых трубопроводах также не учитывает влияние материала трубопровода на критическую скорость:

$$i = \frac{\lambda}{1 - e^{-n}} \frac{V^2}{2gD}; \quad V_{kp} = 6 \sqrt[3]{2gDw} \sqrt{Ar} \sqrt[6]{C}; \quad (8)$$

$$n = \frac{1}{\sqrt{C}} \left( 1 - 0,7 \frac{V_{kp}}{V} \right); \quad C = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_T - \rho_0},$$

где  $w$  – гидравлическая крупность твердых частиц, м/с.

Зависимости (6) – (8) не учитывают параметры гранулометрического состава частиц, характеризующие его разнородность. Среди алгоритмов третьей группы наиболее полно особенности гранулометрического состава транспортируемого материала учитывает методика С.Г. Коберника и В.И. Войтенко, однако и в ней не учитывается влияние материала трубопровода на критическую скорость [18].

Этот недостаток методик второй группы может быть устранен, если вместо используемых в них эмпирических формул применить обобщенную зависимость, полученную специалистами ИГМ НАН Украины [9],

$$V_{kp} = 9 \sqrt{\text{Arg}D \frac{V}{\Delta}} \sqrt[6]{C\psi}; \quad \psi = \frac{w}{\sqrt{gd}}, \quad (9)$$

где  $\Delta$  – шероховатость внутренней поверхности трубопровода, мм;  $\psi$  – коэффициент фиктивного лобового сопротивления [9, 20];  $d$  – средневзвешенный диаметр частиц, м;  $w$  – скорость стесненного падения частиц, м/с.

Использование формул (6) и (9) совместно с методикой С.Г. Коберника и В.И. Войтенко позволяет определить все параметры гидротранспорта для полиэтиленового трубопровода в зависимости от состояния внутренней поверхности трубы:

$$i = i_0 \frac{\rho}{\rho_0} + \wp \frac{\lambda_{kp}}{V} \sqrt{\psi C Ar} \frac{V}{\Delta}; \quad \lambda_{kp} = \frac{a}{(\lg \text{Re}_{kp} - b_{\Delta})^2}, \quad (10)$$

где  $\wp$  – коэффициент, зависящий от плотности и концентрации твердых частиц [18].

Анализ формул (8) – (10) показывает, что значения параметров гидротранспорта для полиэтиленовых труб в процессе их эксплуатации будут определяться изменением величины  $\Delta$  и видом функциональной зависимости  $b_{\Delta}(\Delta)$ .

Можно предположить, что в результате взаимодействия с транспортируемым материалом полиэтиленовые трубопроводы, в отличие от железных, не шлифуются, а «лохматятся», то есть их шероховатость увеличивается. Естественно, при этом потери напора при движении воды возрастают. На основании этого можно спрогнозировать, что величина  $b_{\Delta}$  с увеличением  $\Delta$  также возрастает.

Таким образом, в рамках методического подхода, используемого в алгоритмах второй группы, можно сделать следующие прогнозы относительно параметров гидротранспорта для полиэтиленовых трубопроводов: в новых полиэтиленовых трубопроводах значение полного гидравлического уклона может быть меньше, чем в стальных трубах такого же диаметра; по мере эксплуатации полиэтиленовых трубопроводов величины гидравлических уклонов, обусловленных течением несущей жидкости, могут возрастать, а величины гидравлических уклонов, обусловленных взвешиванием твердых частиц, – снижаться; в процессе эксплуатации полиэтиленовых трубопроводов для каждого значения шероховатости внутренней поверхности трубы может существовать скорость течения пульпы, при которой полный гидравлический уклон будет минимальным; критические скорости гидротранспортирования в новых полиэтиленовых трубопроводах могут быть выше, чем в стальных такого же диаметра, однако этот фактор может оказаться несущественным, так как рабочие скорости пульпы в полиэтиленовых трубопроводах будут большими, чем в стальных; по мере эксплуатации полиэтиленового трубопровода значение критической скорости в нем будет уменьшаться и со временем, при значительном увеличении шероховатости, может стать меньшим, чем значение критической скорости в стальном трубопроводе.

К третьей группе относятся методики, в которых предполагается, что каждый класс крупности транспортируемого материала вносит свой вклад в величины гидравлического уклона и критической скорости пропорционально его массовой доле. Наиболее известными методиками этой группы являются методики А.Е. Смолдырева и П.Г. Дмитриева.

Формулы, предложенные А.Е. Смолдыревым для расчета параметров гидротранспорта полидисперсных гидросмесей, могут быть записаны так [7]:

$$V_{kp} = C_0 \sqrt{gD} \sqrt[3]{\frac{wS_2}{\sqrt{d_{cp}}} \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)}} + B_0 \sqrt{fgDS_3 \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)}}; \quad (11)$$

$$i = i_0 \left( 1 + \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)} S_1 \right) + \left( C_1 S_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + f S_3 \right) \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)}; \quad (12)$$

где  $V_{kp}$  – критическая скорость гидротранспортирования, м/с;  $C_0$ ,  $C_1$  – эмпирические константы;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – объемные концентрации соответственно тонких, мелких и кусковых фракций;  $B_0$  – эмпирическая константа;  $f$  – обобщенный коэффициент трения частиц о нижнюю стенку трубы;  $d_{cp}$  – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции, м;  $w$  – скорость стесненного падения частиц мелкой фракции, м/с.



Формулы, полученные Г.П. Дмитриевым для расчета параметров гидротранспорта полидисперсных гидросмесей, имеют вид [5]

$$V_{kp} = C_{k1} \sqrt[3]{wgDArS_2 \frac{1-S_0-S_1}{1+Ar(S_0+S_1)}} + C_{k3} \sqrt{gDArS_3 \frac{1-S_0-S_1}{1+Ar(S_0+S_1)}};$$

$$i = C_{k0} \frac{\lambda_c}{\lambda_0} [1 + (S_c + S_1)Ar] i_0 + Ar \left( C_{k2} S_2 \frac{w_c}{V} + C_{k4} S_3 \right) \frac{1-S_0-S_1}{1+Ar(S_0+S_1)};$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\left( 1.81 \lg \left( \frac{\rho_c V D}{\mu_c} \right) - 1.52 \right)^2},$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент гидравлического сопротивления для суспензии с частицами крупностью менее 0,074 мм;  $S_c$  – объемная доля частиц крупностью менее 0,074 мм;  $\rho_c$  – плотность суспензии с частицами крупностью менее 0,074 мм;  $\mu_c$  – динамический коэффициент вязкости суспензии с частицами крупностью менее 0,074 мм;  $C_{k0}, C_{k1}, C_{k2}$  – эмпирические коэффициенты [5, 7];  $C_{k3}, C_{k4}$  – эмпирические коэффициенты.

Если транспортируемый материал не содержит частиц крупностью более 2 мм, то по этим методикам можно с использованием формулы (5) формально определить все параметры гидротранспорта, так как неизвестно, зависят ли дополнительные гидравлические уклоны от состояния стенки трубы. При наличии в материале частиц крупностью более 2 мм при расчете по этим методикам необходимо знать величину обобщенного коэффициента трения частиц о стенку пластмассовой трубы. А такие данные известны только для стальных трубопроводов. Авторы этих методик не регламентируют выбор значений эмпирических коэффициентов  $C_0, C_1, B_0, f, C_{k0}, C_{k1}, C_{k2}, C_{k3}$  и  $C_{k4}$ , которые варьируются в значительных пределах, а поэтому неизвестно, изменяются ли их значения при течении в полиэтиленовом трубопроводе [5, 7, 17]. Для исследования этого вопроса представим формулы методики А.Е. Смолдырева (11) и (12) в следующем виде [7]:

$$Fr_{kp} = c' \sqrt[3]{AS_2 \psi} + c'' \sqrt{fAS_3}; \quad i = i_0(1 + AS_1) + c_1 AS_2 \frac{\psi}{Fr} + fAS_3; \quad (13)$$

$$A = \frac{Ar(1-S_1)}{1+ArS_1}; \quad Fr_{kp} = \frac{V_{kp}}{\sqrt{gD}}; \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}.$$

Появление констант  $c'$  и  $c''$  обусловлено использованием при получении формулы для расчета критической скорости (табл. 1) постулата гравитационной теории А.К. Великанова [3]

$$\frac{i_{kp} - i_0^{kp}}{i_{kp}} = K_V, \quad (14)$$

где  $i_{kp}, i_0^{kp}$  – гидравлический уклон пульпы и воды в критическом режиме;  $K_V$  – константа.

Таблица 1 – Формулы для расчета параметров гидротранспорта для транспортируемых материалов различного гранулометрического состава

Фракции частиц	Формулы для расчета параметров гидротранспорта		
	$i$	$Fr_{kp}$	Коэффициентов
мелкие	$i_0 + c_1 ArS \frac{\psi}{Fr}$	$c' \sqrt[3]{AS_2 \psi}$	$c' = \sqrt[3]{\frac{2c_1(1-K_V)}{K_V \lambda_{kp}}}$
Тонкие и мелкие	$i_0(1 + AS_1) + c_1 AS_2$	$c' \sqrt[3]{AS_2 \psi}$	$c' = \sqrt[3]{\frac{2c_1}{\lambda_{kp}} \frac{1-K_V}{AS_1(1-K_V) - K_V}}$
Тонкие и кусковые	$i_0(1 + AS_1) + fAS_3$	$c'' \sqrt{fAS_3}$	$c'' = \sqrt{\frac{2}{\lambda_{kp}} \frac{1-K_V}{AS_1(1-K_V) - K_V}}$
кусковые	$i_0 + fAS$	$c'' \sqrt{fAS}$	$c'' = \sqrt{\frac{2(1-K_V)}{\lambda_{kp} K_V}}$

Из табл. 1 видно, что при подстановке (14) в (13) величины  $c'$  и  $c''$  не являются константами, а вычисляются по формулам

$$c'' = \sqrt{c}; \quad c' = \sqrt[3]{c_1 c}; \quad c = \frac{2}{\lambda_{kp} F}, \quad (15)$$

где  $F$  – функция, зависящая от гранулометрического состава транспортируемого материала и константы  $K_V$  (табл. 2).

Таблица 2 – Формулы для расчета функции  $F$

Фракции частиц	Формулы для расчета функции $F$
Мелкие или кусковые при отсутствии тонких	$\frac{K_V}{1-K_V}$
Мелкие или кусковые в присутствии тонких	$\frac{AS_1(1-K_V) - K_V}{1-K_V}$

С помощью формул (15) возможна адаптация методики А.Е. Смолдырева (13) к условиям полимерных труб:

$$Fr_{kp} = \sqrt[3]{qc'} \sqrt[3]{AS_2 \psi} + \sqrt{qc''} \sqrt{fAS_3}; \quad i = i_0(1 + AS_1) + c_1 AS_2 \frac{\psi}{Fr} + fAS_3;$$

$$q = \frac{0,3864}{\lambda \lg^2(0,1Re)}; \quad Re = \sqrt{GmFr}; \quad Gm = \frac{gD^3}{\nu^2},$$

где  $\sigma$  – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение коэффициента трения кусковых частиц о дно трубы;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воды.

Для расчетов величин  $i_0$  и  $\lambda$  в полимерных трубах известны методики [13, 14, 19], рекомендуемые следующие степенные зависимости (табл. 2):

$$i_0 = K \frac{V^M}{D^N}; \quad \lambda = \frac{m}{Re^n},$$

которые позволяют оценить интервалы изменения параметра  $q$  в соответствующем диапазоне чисел Рейнольдса (рис. 1, табл. 3).

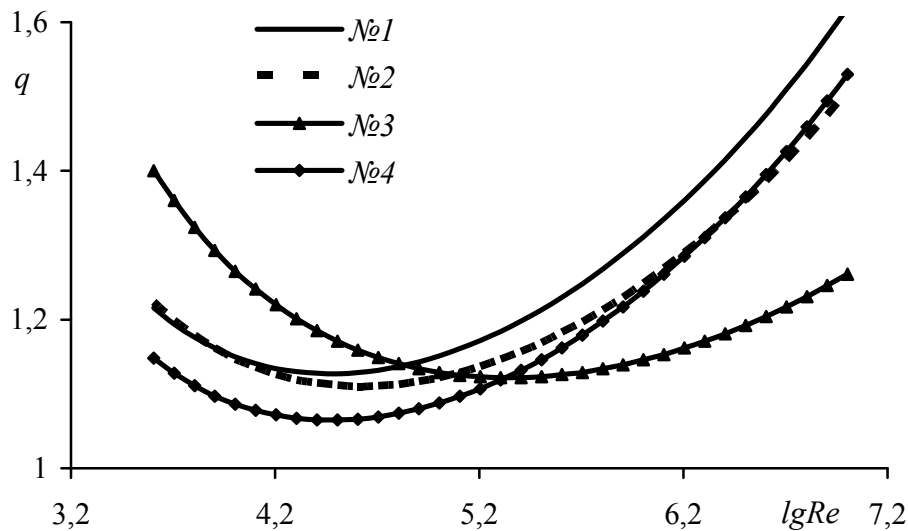


Рис. 1 – Зависимость величины  $q$  от числа Рейнольдса для различных методик

Таблица 3 – Значения коэффициентов, используемых для гидравлического расчета полимерных труб по различным методикам

№	Методика	$K$	$M$	$N$	$m$	$n$	$\bar{q}$	$q_{\min}$	$q_{\max}$
1	СНиП 2.04.02-85	0,000646	1,774	1,226	0,226	0,271	1.260	1.127	1.619
2	ISO TR 10501	0,000537	1,760	1,240	0,240	0,273	1.218	1.110	1.508
3	ISO TR 10501	0,000579	1,800	1,200	0,200	0,171	1.189	1.122	1.400
4	ИГТМ НАНУ	0,000543	1,750	1,250	0,250	0,316	1.191	1.065	1.530

Величина  $\sigma$  показывает, во сколько раз коэффициент трения кусковых фракций транспортируемого материала о дно стальной трубы превышает соответствующую величину для условий полимерных труб. Для стальных труб ве-

личина коэффициента  $f$  определялась экспериментально, поэтому и для полимерных труб необходимо проводить аналогичные исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
2. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
3. Семененко Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е. В. Семененко. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
4. Шурыгин В.Д. Анализ способов повышения эффективности работы гидротранспортного комплекса / В.Д. Шурыгин, Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – №6. – С. 70 – 74.
5. Дмитриев Г.П. Напорные гидротранспортные системы / Г.П. Дмитриев, Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
6. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности / В.Н. Покровская. – М.: Недра, 1985. – 191 с.
7. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии / А. Е. Смолдырев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1985. – 383 с.
8. Силин Н.А. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов / Н.А. Силин, С.Г. Коберник. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 138 с.
9. Гидротранспорт (вопросы гидравлики) / Н.А. Силин, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик, В.Ф. Очеретько. – К.: Наук. думка, 1971. – 158 с.
10. Применение гидродинамически активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях / А.В. Ступин, П.В. Асланов, А.П. Симоненко [и др.] // *Прикладна гідромеханіка*. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74 – 81.
11. Погребняк В.Г. Растворы полимеров в условиях пристеночной турбулентности и механизм снижения гидравлического сопротивления / В.Г. Погребняк, А.А. Писаренко // *Прикладна гідромеханіка*. – 2000. – Т. 2 (74), № 2. – С. 83 – 95.
12. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
13. Шурыгин В.Д. Расчет параметров гидротранспортного комплекса при использовании полиэтиленовых труб / В.Д. Шурыгин, Е.В. Семененко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – №2. – 2007. – С. 71 – 74.
14. Шурыгин В.Д. Износ полиэтиленовых труб при гидротранспорте исходных песков Малышевского месторождения / В.Д. Шурыгин, Е.В. Семененко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – №6. – 2007. – С. 90 – 93.
15. Юфин А.П. Гидромеханизация / А.П. Юфин. – М.: Стройиздат, 1965. – 496 с.
16. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки / С.И. Криль. – К.: Наук. думка, 1990. – 160 с.
17. Коберник С.Г. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов / С.Г. Коберник, В.И. Войтенко. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
18. Швабауэр В. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс / В. Швабауэр, И. Гвоздев, М. Горилловский // *Полимерные трубы*. Украина. – 2006. – №1(1). – С. 46 – 52.
19. Трайнис В.В. Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам / В.В. Трайнис. – М.: Наука, 1970. – 191 с.

Кандидаты техн. наук Т.В. Бунько,  
И.Е. Кокоулин,  
инженеры Н.В. Безкровный, С.А. Головкин  
(ИГТМ НАН Украины)

## **РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ С УЧЕТОМ РАВНОМЕРНЫХ И НЕРАВНОМЕРНЫХ УТЕЧЕК**

Охарактеризовано метод розрахунку втрат тиску повітря у гірничих виробках за наявності витоків (притоків), який може бути використано під час проектування системи провітрювання шахти з метою вибору засобів місцевого керування повітряних потоків, розрахунку конфігурації ліній витoku у виробленому просторі та при оцінці зміни витоків у аварійній ситуації і розробці методів керування ними.

## **CALCULATION LOSSES OF PRESSURE OF AIR IN MINING WORKINGS TAKING INTO ACCOUNT EVEN AND UNEVEN LEAKAGES**

The method of calculation losses of pressure of air in the mining workings at presence of leakages (inflows), which can be used for planning of the ventilation system of mine with the purpose of choice facilities of the local control of air blast, calculation of configuration lines of leakages in the worked out goaf and at estimation change of leakages in an emergency situation and development methods of control by them.

Решение задач расчета воздухораспределения в горных выработках является основой для выбора как проектных, так и оперативных мероприятий по выбору нормальных и аварийных режимов проветривания горного предприятия. Вместе с тем шахтная вентиляционная система (ШВС) представляет собой не просто соединение горных выработок, как проводников воздуха; в ней имеются зоны, трудно описываемые аналитически, хотя и обладающие определенными аэродинамическими характеристиками. Речь идет о неявных аэродинамических связях между точками ШВС, основными из которых являются утечки воздуха, в том числе через выработанное пространство лав. Без их точного учета при проведении вентиляционных расчетов невозможно создать имитационную модель ШВС, адекватную реальному аналогу, а значит – эффективно решать задачи управления проветриванием. Поэтому решение вопроса о движении воздуха с изменением расхода вдоль горных выработок представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Ввиду отсутствия достаточно точных и проверенных теоретических и экспериментальных данных по этому вопросу, при решении практических задач обычно пользуются зависимостями, выведенными в гидравлике для движения жидкости с постоянной массой. Следует, правда, отметить, что в гидравлических сетях изменение количества движущейся по проводнику жидкости свидетельствует об аварийной ситуации, тогда как в воздухопроводящих сетях является явлением обычным вследствие невозможности обеспечения достаточной степени воздухопроницаемости стенок горных выработок.

Исследования движения воздуха по горным выработкам с утечками (притечками) в литературе освещены недостаточно глубоко и являются весьма не-