Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова,
т. LIV, вып. 1, 1967 г.

УДК 622.647.7

ИЗНОС ТРУБ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

В. Н. Покровская

Изучение физической сущности абразивного износа труб при гидравлическом транспортировании разнофракционных пульп дает возможность решить один из актуальных вопросов этого процесса — их долговечность и надежность. В последнее время этот вопрос вызывает большой интерес исследователей [Турчанинов, 1956, 1963; Чаплин, Богатырев, 1964]. Интенсивность и характер гидроабразивного износа труб определяют параметры, обосновывающие режим транспортирования гидросмеси в трубопроводах; физико-механические свойства транспортируемой пульпы; физико-механические свойства материала труб; химико-механические свойства несущей жидкости.

Взаимодействие этих факторов в той или иной степени влияет на величину износа внутренней поверхности труб, определяет и обусловливает характер и зоны их разрушения.

За основные показатели, характеризующие интенсивность износа, приняты абсолютный износ $\Delta_а$, *г/сек*, и удельный износ $\Delta_у$, *г/т*, отнесенный к весу пропущенного через трубы материала. Закономерности, характеризующие гидроабразивный износ, вытекают из особенностей процесса гидравлического транспортирования, которые связывают показатели интенсивности гидроабразивного износа с основными параметрами гидравлического транспортирования.

Влияние скорости транспортирования на интенсивность гидроабразивного износа. При движении абразивной пульпы по трубопроводу скорость ее движения v, как известно, является основным показателем, определяющим сопротивления, возникающие от трения. Так, при определении удельных потерь напора $i_п = f(v)$.

При транспортировании пульпы износ труб обусловлен главным образом контактным трением твердых частиц о стенки трубопровода, что вызвано турбулентным режимом движения потока, возникновением вихрей и пульсирующим движением частиц в потоке. Все это дает основание считать правомерным наличие квадратичной зависимости показателя износа $\Delta_а$ от скорости движения пульпы. В то же время необходимо учитывать, что при изменении скорости потока происходят сложные превращения в строении потока по сечению.

При скоростях, близких к критическим, частицы материала концентрируются в нижней зоне сечения трубы и частично волочатся по донной ее части, вызывая сильное истирание стенок. В этот период износ зависит главным образом от трения частиц о стенки. С увеличением скорости до критической и выше частицы материала переходят во взвешенное состояние. Влияние трения о стенки на величину сопротивлений (при среднем значении консистенции) значительно уменьшается, но резко возрастает ударный контакт частиц со стенками труб, который при дальнейшем увеличении

скорости потока за счет турбулентного движения потока возрастает пропорционально квадрату скорости. Чем больше возрастает скорость (при постоянной консистенции), тем чаще возникает контакт и тем больше становится сила удара. Эта закономерность подтверждается графиком (рис. 1), характеризующим зависимость показателя абсолютного износа от скорости $\Delta_а = f(v)$, где первая и вторая зоны отмечены цифрами *1—2* и *2—3*. В соответствии с этим, зона оптимальных значений скорости, определенная из условия снижения показателя абсолютного износа, соответствует значению $v_{опт} \approx \approx (1{,}6 \div 2{,}5)\, v_{кр}$. При $v > 2{,}5 v_{кр}$ износ резко возрастает (точка *3*).

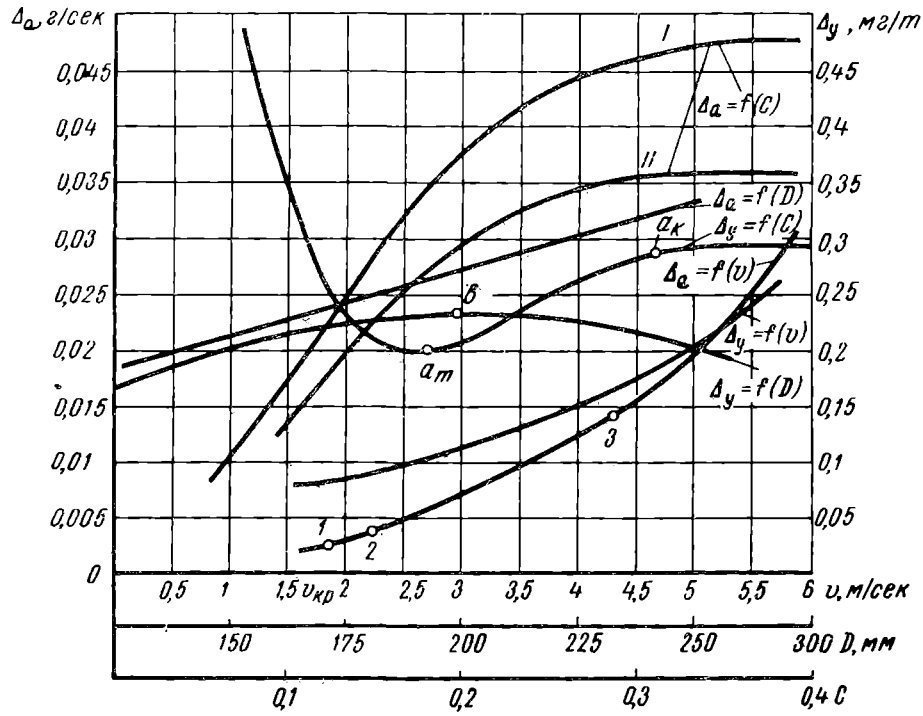


Рис. 1. График зависимости $\Delta_а$ и $\Delta_у$ от C, D и v.

Изменение скорости потока вызывает изменение объемной производительности

$$Q_п = mD^2 v_п, \qquad (1)$$

где $v_п$ — средняя скорость потока, *м/сек*; $m = \frac{3600\pi}{4} = 2830$; D — внутренний диаметр трубопровода, *м*.

Отсюда зависимость показателя удельного износа приобретает линейную закономерность (рис. 1):

$$\Delta_у = \frac{\Delta_а}{Q_т} = A\frac{v_п^2}{v_п} = Av_п, \qquad (2)$$

где Q — весовая производительность установки по пульпе, $Q_т = Q_п C$; C — объемная консистенция пульпы, $т/м^3$; A — условное обозначение всех величин, входящих в формулы определения показателя абсолютного износа и производительности гидротранспортной установки по твердому.

Анализ этих графических зависимостей дает основание заключить, что в практических целях рационально увеличить скорость транспортирования в рекомендуемых выше пределах.

Зависимость показателей гидроабразивного износа от консистенции пульпы. Изменение консистенции пульпы приводит к перераспределению

частиц материала по сечению потока. При малых консистенциях пульпы имеет место свободное пульсационное перемещение частиц в потоке, что создает возможность беспрепятственного контактирования их со стенками труб. В результате угол встречи частиц со стенками возрастает и увеличивается угол контактного удара. Все это обусловливает значительный абсолютный износ труб при малых консистенциях. С увеличением консистенции пульпы увеличивается плотность потока, и, следовательно, периметр контактного трения по сечению трубы. Это приводит к дальнейшему росту интенсивности гидроабразивного износа труб при транспортировании крупнофракционного материала. Предельной точкой роста износа является период полного насыщения потока, когда контактирующая поверхность не имеет дальнейшего приращения. Это характерно главным образом для условий транспортирования мелкофракционных пульп, где насыщение и стабилизация износа совпадают. Точки критических значений консистенции зависят от крупности транспортируемых частиц и общего гранулометрического состава пульпы. Для мелкофракционного материала критическое значение консистенции пульпы будет около 0,33. С повышением крупности частиц оптимальное значение снижается до 0,25.

В соответствии с этим значения консистенции, соответствующие критическим точкам, назовем консистенцией предельного насыщения потока. Критические значения консистенций особенно ярко выражены на мелкофракционных пульпах (при среднем диаметре частиц $d_{ср} \leqslant 1$).

На рис. 1 приведен также график функции $\Delta_а = f(C)$, характеризующий закономерность изменения показателя абсолютного износа труб диаметром 156 *мм* при транспортировании мелкофракционного материала, с включением крупных частиц (кривая *I*) и без них (кривая *II*). Абсолютный износ трубопровода находится в почти прямой зависимости от величины консистенции до критической точки насыщения потока a_m. В этой точке характер зависимости нарушается, и затем показатель абсолютного износа остается практически постоянным.

Показатель удельного износа труб — основной показатель эффективности работы установки. Характер его зависимости от консистенции имеет более сложную закономерность, что обусловлено увеличением износа с повышением консистенции и ростом производительности установки по твердому. При этом увеличение износа характеризуется постепенным затуханием приращения при нарастании производительности в несколько раз.

В соответствии с $\Delta_у = f(C)$, где $\Delta_у = \frac{\Delta_а}{Q_т}$,

$$\Delta_у = \frac{\Delta_а}{Q_п C} \tag{3}$$

и при малых значениях консистенции, когда свободные пульсирующие частицы интенсивно контактируют со стенками труб, а производительность по твердому минимальна, значения показателя удельного износа возрастают максимально. Затем, по мере увеличения C и, следовательно $Q_т$, значения показателя $\Delta_у$ снижаются и достигают минимальной точки a_m в пределах консистенций, соответствующих началу насыщения пульпы. При дальнейшем увеличении C (при постоянных значениях v) число контактных частиц резко возрастает, но повышается и $Q_т$. На графике этот участок характеризуется сглаженной плавной кривой a_m — $a_к$, достигающей критической точки $a_к$, которая соответствует точке полного насыщения пульпы. При дальнейшем росте консистенции $\Delta_у$ практически остается постоянным.

Зависимость гидроабразивного износа от диаметра трубопровода. По экспериментальным данным абсолютные и удельные показатели гидроабразивного износа имеют различные закономерности изменения в функции диаметра трубопровода. Абсолютный показатель износа находится в прямо пропорциональной зависимости от диаметра труб. При этом с увеличением

диаметра примерно на 50 *мм* абсолютное значение износа изменяется по резко отличной закономерности, так как

$$\Delta_{\text{у}} = \frac{\Delta_{\text{а}}}{Q_{\text{т}}} = \frac{\Delta_{\text{а}}}{mD^2vC} \qquad (4)$$

Следовательно, изменение диаметра трубопровода оказывает большое влияние на величину показателя удельного износа, что и отражает график $\Delta_{\text{у}} = f(D)$. Кривая имеет ярко выраженный максимум в точке b, после чего с увеличением D удельный износ уменьшается (при $v = \text{const}$), хотя абсолютное значение износа и возрастает.

Зависимость гидроабразивного износа труб от крупности транспортируемого материала. Крупность частиц транспортируемого по трубам мате-

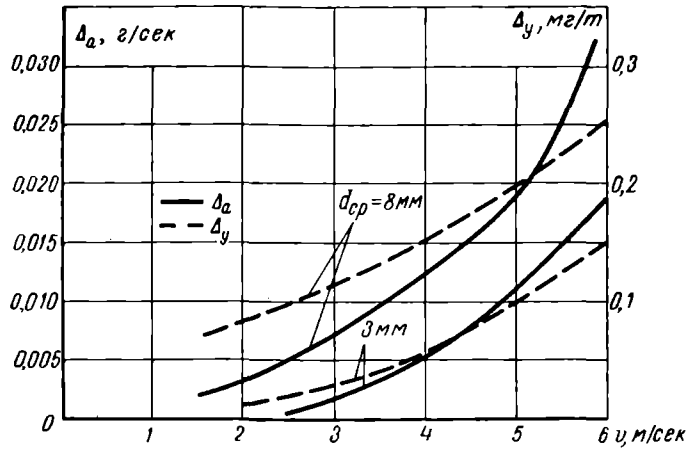


Рис. 2. График зависимости $\Delta_{\text{а}}$ и $\Delta_{\text{у}}$ от d и v для материалов с $d_{\text{ср}}$, равным 3 и 8 *мм*.

риала во многом определяет характер и интенсивность процесса гидроабразивного износа. Так как производительность трубопроводной линии от крупности частиц не зависит, изменения абсолютного и удельного показателя износа имеют одну и ту же закономерность. Она в основном характеризуется прямо пропорциональной зависимостью $\Delta_{\text{а}}$ и $\Delta_{\text{у}}$ от крупности зерен материала. В то же время по обобщенным данным эксперимента гидроабразивный износ изменяется по зонам с практически одинаковыми показателями износа. В основном можно выделить четыре зональные группы материалов по фракционному составу и абразивности воздействия на стенки труб.

Группа I (тонкие глинистые пески, с крупностью частиц до 2 *мм*) дает минимальные показатели износа. Группа II (кварцевые пески, со средней крупностью частиц от 2 до 5 *мм*) характеризуется увеличением износа труб относительно материалов первой группы в 1,5—1,7 раза, группа III (гравий, с крупностью частиц от 6 до 15 *мм*) — в 3,0—3,5 раза, группа IV (щебень, с крупностью частиц свыше 15 *мм*) — в 7—10 раз.

Наличие свыше 40—45% мелких фракций придает материалу (по характеру и степени вызываемого износа) свойства, близкие мелкофракционному. Анализ графических зависимостей рис. 2 показывает, что крупность частиц, особенно ее масса, существенно меняют характер контакта частиц со стенками труб, что и определяет особенности процесса гидроабразивного износа.

Частицы транспортируемого материала имеют приращение силы удара, пропорциональное своей массе. Все это увеличивает абсолютный износ при крупнофракционном материале с изменением крупности частиц на 1—2 *мм*, в то время как при мелкофракционном песке абсолютный (с крупностью частиц 0,5—3 *мм*) износ практически почти не меняется. В этом случае большое значение имеет различие структуры потока, например при щебневых

и песчаных пульпах. Щебневые пульпы относятся к механическим неоднородным смесям, с резкой дифференциацией частиц по сечению потока и значительным дефицитом скоростей. Это усиливает перемещение частиц в потоке, увеличивает число контактов частиц со стенками труб. С увеличением консистенции насыщение потока в этом случае не повышается, частицы уплотняются по потоку, все большее число частиц прижимается к стенкам труб и распор их все возрастает.

Песчаные мелкофракционные пульпы по своим свойствам приближаются к однородным тяжелым жидкостям, свойства которых особенно проявляются с увеличением консистенции пульпы. Насыщенный поток почти однороден, динамически устойчив, взаимодвижение частиц стеснено, частицы не выпадают на донную часть и не сталкиваются со стенками труб. В этом случае имеет место так называемый скользящий удар, чем главным образом и обусловлено незначительное возрастание абсолютного износа при существенном увеличении консистенции мелкофракционной пульпы.

Таким образом, величина контактного трения определяется свойствами материала: гидравлическим коэффициентом трения $f_т$, скоростью передвижения пульпы по трубам $v_п$, консистенцией пульпы C, крупностью частиц $d_{ср}$. Параметры, определяющие износ трубопровода, характеризуют этот процесс как контактное трение, с учетом специфических явлений гидравлического транспортирования: диффузии частиц, пульсирующего характера течения, скачкообразного перемещения частиц, турбулентного режима движения потока и т. д. Следовательно, в основе определения показателя абсолютного износа заложены закономерности, связывающие процесс с сопротивлением, возникающим в трубопроводе, и основными параметрами, характеризующими процесс гидравлического транспортирования.

Как показывают проведенные исследования, абсолютные показатели износа $\Delta_{а'}$ можно определить по предлагаемой зависимости

$$\Delta_{а'} = \frac{f_т v_п^2 d_{ср} L D \gamma_п}{2gt} k_у, \tag{5}$$

где $f_т$ — коэффициент трения, величина которого в зависимости от типа транспортируемого материала может быть принята для материалов группы I — 0,016—0,017; группы II — 0,021—0,023; групп III и IV— 0,028—0,035; L — длина трубопровода, *м*; g — ускорение силы тяжести, *м/сек*^{2}; $\gamma_п$ — плотность пульпы, определяемая ее консистенцией, *т/м*^{3}; t — время работы трубы, *сек*; $k_у$ — коэффициент удельной износостойкости материала труб, *г/т*. Методом математической статистики установлены следующие значения $k_у$ для различных сталей: для закаленной 0,1—0,11; для высокоуглеродистой (Ст. 45, У-8) 0,13—0,15; для малоуглеродистой (Ст. 2) 0,23—0,32.

Абсолютный износ на 1 *м* трубы

$$\Delta_а = \frac{\Delta_{а'}}{L}. \tag{6}$$

Практически удобнее $\Delta_у$ измерять в миллиграммах на тонну:

$$\Delta_у = 70 f_т \frac{v_п d}{D} \cdot \frac{\gamma_п}{C\gamma_т} k_у, \tag{7}$$

где $\gamma_т$ — удельный вес твердого.

Сравнение значений показателя удельного износа, рассчитанных и экспериментальных для нормальных рабочих режимов, дает вполне удовлетворительную степень погрешности — 3—4%.

ЛИТЕРАТУРА

Турчанинов С. П. Снижение износа пульповодов при гидравлической закладке. Механизация трудоемких и тяжелых работ, № 4, 1956.

Турчанинов С. П. Влияние режимов гидротранспорта на долговечность пульповодов. Гидродобыча угля, № 1, 1963.

Чаплин Б. Н., Богатырев А. П. Износ землесосов и трубопроводов при гидротранспортировании дробленых коренных пород. Недра, 1964.