

В ы в о д ы

1. Установлено, что значения коэффициента гидравлического трения в трубопроводах с непрерывной раздачей жидкости существенно отличаются от коэффициента λ при равномерном движении. Предложено определять значения коэффициента λ в любом сечении по длине трубопровода от начального сечения через поправочный переходный коэффициент $A = \exp(-1,75 k \frac{x}{L})$.

2. Описано уравнение движения жидкости при распределении воды перфорированным трубопроводом постоянного поперечного сечения с учетом принятого закона изменения расхода вдоль пути.

Л и т е р а т у р а

1. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы. Харьков, 1964.
2. Егоров А.И. Распределение воды дырчатыми трубами с постоянным шагом отверстий.—"Труды института ВОДГЕО", 1972, вып. 36.
3. Смыслов В.В., Константинов Ю.М. К расчету дырчатых труб с раздачей расхода вдоль пути.—В сб. : Гидравлика и гидротехника. Вып. 12. Киев, 1971.
4. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. М., 1971.
5. Смыслов В.В., Езерский Н.О. Анализ уравнения движения жидкости в трубопроводах с переменной раздачей вдоль пути.—В сб. : Гидравлика и гидротехника. Вып. 18. Киев, 1974.
6. Ненько Я.Т. О движении жидкости с переменной вдоль потока массой. Харьков, 1938.
7. Альтшуль А.Д. Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М., 1965.

А.И. Куприн, Е.К. Седых, А.М. Тихонцов

МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЯ ОТКРЫТОГО ПОТОКА ПУЛЬПЫ НА ЗАКРУГЛЕНИЯХ

Движение пульпы на закруглениях (в коленах) характеризуется прежде всего изменением величины и формы живого сечения потока.

Под действием центробежной силы в желобе с внутренней стороны закругления уменьшается глубина потока, вследствие

чего создаются условия для остановки крупных твердых частиц.

Уровень жидкости у внешней стенки значительно увеличивается, что может приводить к переливу воды через борт. Кроме этого, на повороте образуются более или менее значительные зоны, в которых наблюдаются вихри и противотоки жидкости.

В настоящей работе приводятся формулы, необходимые для расчета геометрических параметров потока прямоугольной формы на закруглении (высота внешней стенки на закруглениях, угол наклона дна желоба в поперечном сечении к горизонту и др.). Определение этих параметров позволяет более обоснованно вести проектирование трасс безнапорного гидротранспорта.

Найдем разницу уровней жидкости у внешней и внутренней стенок желоба, исходя из дифференциального уравнения Гюйгенса для свободной поверхности [1]:

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0, \quad (1)$$

где X , Y , Z — проекции сил, действующих на единицу массы ($m = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$) жидкости в месте закругления.

Интегрируя уравнение (1), получим

$$h = 2,3 \frac{v_3^2}{g} \lg \frac{R}{r}, \quad (2)$$

где v_3 — средняя скорость движения пульпы на закруглении; R — радиус закругления наружной стенки желоба; r — радиус закругления внутренней стенки желоба.

Непосредственно по формуле (2) еще нельзя определить величину h , а следовательно, и другие параметры сечения потока на закруглениях, так как неизвестен радиус закругления r .

Чтобы получить расчетные формулы, с помощью которых можно определить абсолютные размеры живого сечения потока на закруглении, считаем, что свободная поверхность жидкости в сечении представляется прямой линией. Это можно предположить на основании того, что ширина желобов, применяющихся в промышленности, относительно невелика.

Определим, например, погрешность этого допущения, если $r = 1,2$ м; $R = 1,6$ м; $v_3 = 2,5$ м/с. Превышение h , если его определить по формуле (2), будет равно

$$h = 2,3 \frac{2,5^2}{9,8} \lg \frac{1,6}{1,2} = 0,183 \text{ м.}$$

Превышение h'_0 в середине желоба, определенное по той же формуле, равно

$$h'_0 = 2,3 \frac{2,5^2}{9,8} \lg \frac{1,4}{1,2} = 0,096 \text{ м.}$$

Превышение h''_0 в середине желоба при допущении, что проекция свободной поверхности на вертикальную плоскость представляется в виде прямой линии, будет равно

$$h''_0 = \frac{h}{2} = \frac{0,183}{2} = 0,0915 \text{ м.}$$

Таким образом, для практических расчетов можно считать, что

$$h'_0 = h''_0 \quad (3)$$

Определим геометрические размеры живого сечения потока на закруглениях вначале при условии, что дно желоба в поперечном сечении располагается горизонтально (рис. 1, а, б, в).

Площадь поперечного сечения потока ω_3 закруглений с достаточной степенью точности можно определить так:

$$\omega_3 = \frac{1}{2} b_3 h \quad (4)$$

или

$$\omega_3 = \frac{2h_{в.з} + h}{2} b_0, \quad (5)$$

где b_3 -- ширина части желоба на закруглении, находящейся под водой; $h_{в.з}$ -- глубина потока жидкости у внутренней стенки закругления; b_0 -- ширина желоба на закруглении.

На основании неразрывности (сплошности) потока можно написать:

$$\omega_0 v_0 = \omega_3 v_3, \quad (6)$$

где ω_0 -- площадь живого сечения потока до закругления; v_0 -- средняя скорость движения потока до закругления; ω_3 -- площадь живого сечения потока в месте закругления.

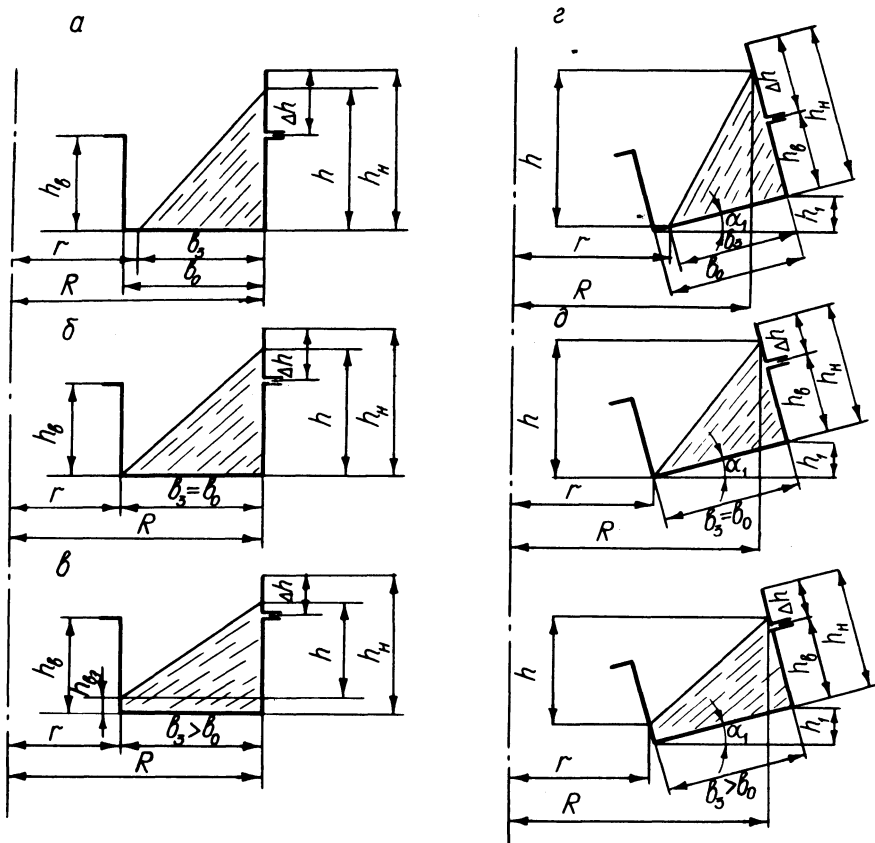


Рис. 1. Возможные схемы поперечного сечения потока на закруглении.

Будем считать, что средняя скорость потока на закруглении пропорциональна средней скорости потока на прямоугольном участке желоба

$$v_3 = k_3 v_0, \quad (7)$$

где k_3 -- коэффициент пропорциональности.

На основании (6) и (7) можно написать:

$$\omega_3 = \frac{1}{k_3} \omega_0, \quad (8)$$

или
$$\frac{1}{2} b_3 h = \frac{1}{k_3} b_0 h_0, \quad (9)$$

$$\text{или} \quad (R - r) \frac{h}{2} = \frac{1}{k_3} b_o h_o . \quad (10)$$

$$\text{Отсюда} \quad h = \frac{2b_o h_o}{k_3 (R - r)} . \quad (11)$$

Приравняем правые части равенства (2) и (11); получим

$$\frac{2b_o h_o}{k_3 (R - r)} = 2,3 \frac{v_3^2}{g} \lg \frac{R}{r} . \quad (12)$$

Находим

$$\frac{2b_o h_o}{k_3 (R - r)} = 2,3 \frac{k_3^2 v_o^2}{g} \lg \frac{R}{r} . \quad (13)$$

Из формулы (13) можно легко определить r , так как все остальные величины известны, а значение R выводим из соотношения

$$R = R_o + \frac{b_o}{2} , \quad (14)$$

где R_o -- радиус закругления по центру желоба,

$$R_o = (4 - 5)b_o . \quad (15)$$

После определения r найдем величину b_3 :

$$b_3 = R - r . \quad (16)$$

Величина b_3 , вычисленная по формуле (16), может быть равна, меньше или больше ширины желоба, а глубина потока жидкости у внутренней стенки желоба соответственно равна или больше нуля.

Если величина b_3 , найденная по формуле (16), будет равна или меньше b_o (рис. 1, а, б), то искомую величину h можно определить из выражения (11).

Если будет больше b_o (рис. 1, в), то величину h легко вычислить по формуле (2), так как значения r и R становятся известными, а величина h v_3 может быть определена из выражений (2), (5) - (8), т.е.

$$h_{в,з} = \frac{1}{k_3} h_0 - 2,3 \frac{k_3^2 v_0^2}{2g} \lg \frac{R}{R - b_0} \quad (17)$$

Наблюдения за потоками в шахтных условиях [2] показали, что для большей гарантии исключения перелива воды на закруглении необходимо, чтобы высота внешней стенки была на 100 мм больше высоты, полученной по формуле (11). Это необходимо делать потому, что вследствие неравномерности движения твердых материалов в потоке их концентрация на закруглении временно может превышать расчетные значения.

Таким образом, окончательное определение высоты наружной стенки для случаев, изображенных на (рис. 1, а, б), следует производить по формуле

$$h_n = \frac{2 b_0 h_0}{k_3 (R - r)} + 0,1 \text{ м.} \quad (18)$$

Для случая, изображенного на рис. 1, в, высоту наружной стенки желоба на закруглении можно найти по выражениям (2) и (17) с учетом гарантии исключения перелива жидкости на закруглении:

$$h_n = h + h_{в,з} + 0,1 \text{ м.} \quad (19)$$

Высота h_B внутренней стенки желоба на закруглении равна высоте прямолинейного участка желоба.

Следовательно, превышение Δh наружной стенки закругления по отношению к внутренней стенке для случаев, изображенных на рис. 1, а, б, должно быть определено по формуле

$$\Delta h = \frac{2 b_0 h_0}{k_3 (R - r)} + 0,1 - h_{в,з} \quad (20)$$

а превышение Δh наружной стенки закругления по отношению к внутренней стенке для случаев, изображенных на рис. 1, в, должно быть равно

$$\Delta h = h + h_{в,з} + 0,1 - h_B \quad (21)$$

Нами найдены параметры сечения потока на закруглении при горизонтальном расположении дна желоба в поперечном сечении (рис. 1, б, в).

Заметим, что такое расположение желоба целесообразно только при перемещении однофазных жидкостей.

При перемещении потока жидкости, содержащего твердые частицы, в указанных случаях на закруглении под действием центробежной силы происходит крайне нежелательный сдвиг перемещаемого материала к внешней стенке и образование локальной зоны повышенной концентрации, что может служить причиной запруживания желобчатого става на всем его протяжении.

Для исключения прижатия частиц к внешней стенке желоба под действием центробежной силы, а следовательно, для более равномерного распределения твердых частиц по ширине желоб целесообразно укладывать на закруглении с некоторым углом α_1 к горизонту (рис. 1, г, д, е). Наклон дна желоба на угол α_1 способствует более равномерному распределению жидкости по ширине желоба в месте закругления.

Определить угол наклона дна желоба к горизонту можно по формуле [3]

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{v^2}{gR_0}, \quad (22)$$

где v_T — средняя скорость движения твердых частиц на закруглении; g — ускорение силы тяжести.

Средняя скорость движения твердых частиц на закруглении также пропорциональна средней скорости движения потока до закругления:

$$v_T = k_{з,т} v_0, \quad (23)$$

Для обеспечения угла наклона дна желоба на угол α_1 внутреннюю стенку желоба шириной b_0 на закруглении надо опустить или внешнюю поднять на высоту

$$h_1 = b_0 \sin \alpha_1. \quad (24)$$

Теперь определим геометрические параметры сечения потока на закруглении при условии, если $\alpha_1 > 0$.

По аналогии с выражением (9) для случая, изображенного на рис 1, д, можно написать

$$\frac{1}{2} - \frac{h - h_1}{\cos \alpha_1} b_3 = \frac{1}{k_3} b_0 h_0, \quad (25)$$

откуда

$$h = \frac{2b_o h_o \cos \alpha_1}{k_3 b_3} + h_1. \quad (26)$$

С другой стороны, высоту h можно вычислить по формуле (2), учитывая при этом, что радиусы R и r приближенно можно определить так:

$$r = R_o - \frac{b_o}{2} \cos \alpha_1, \quad (27)$$

$$R = R_o + \frac{b_o}{2} \cos \alpha_1 - (h - h_1) \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (28)$$

Таким образом,

$$h = \frac{v_3^2}{g} 2,3 \operatorname{lg} \frac{R_o + \frac{b_o}{2} \cos \alpha_1 - (h - h_1) \operatorname{tg} \alpha_1}{R_o - \frac{b_o}{2} \cos \alpha_1}. \quad (29)$$

Решая систему уравнений (26) и (29), нетрудно найти величину b_3 .

Если b_3 окажется меньше, чем b_o (рис. 1, г), тогда для определения геометрических параметров сечения потока на закруглении можно пользоваться равенством, аналогичным (25):

$$\frac{1}{2} [h - h_1 + (b_o - b_3) \sin \alpha_1] \frac{b_3}{\cos \alpha_1} = \frac{1}{k_3} b_o h_o, \quad (30)$$

откуда

$$h = \frac{2b_o h_o \cos \alpha_1}{k_3 b_o} + h_1 - (b_o - b_3) \sin \alpha_1. \quad (31)$$

Высоту h можно определить также по формуле (2), имея в виду, что радиусы R и r приближенно находят по выражениям:

$$r = R_o + \frac{b_o}{2} \cos \alpha_1 - b_3 \cos \alpha_1, \quad (32)$$

$$R = R_o + \frac{b_o}{2} \cos \alpha_1 - [h + (b_o - b_3) \sin \alpha_1 - h_1] \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (33)$$

Если b_3 окажется больше b_0 (рис. 1, е), для определения геометрических параметров сечения потока на закруглении следует воспользоваться равенствами (17) -- (19).

В этом случае значение радиусов R и r находят так:

$$R = R_0 + \frac{b_0}{2} \cos \alpha_1 - (h_{в.з} + h) \sin \alpha_1, \quad (34)$$

$$r = R_0 - \frac{b_0}{2} \cos \alpha_1 - h_{в.з} \sin \alpha_1. \quad (35)$$

Таким образом, расчет геометрических параметров потока на закруглении для рассматриваемого случая можно вести, пользуясь уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{2}{k_3} h_0 - 2h_{в.з.}; \\ h &= 2,3 \frac{v_3^2}{g} \lg \frac{R_0 + \frac{b_0}{2} \cos \alpha_1 - (h_{в.з.} + h) \sin \alpha_1}{R_0 - \frac{b_0}{2} \cos \alpha_1 - h_{в.з.} \sin \alpha_1}. \end{aligned} \right\} (36)$$

При монтаже закруглений их следует надежно закреплять, так как возникающая центробежная сила, а также сила давления на внешнюю стенку закругления могут достигать значительных величин и приводить при некачественном монтаже к разрушению трассы желобчатого става.

Для вычисления значения коэффициентов k_3 и $k_{3.т}$ были проведены специальные эксперименты на лабораторной установке, которая включала стальной желоб шириной 175 мм, длиной 7 м; на конце желоба был смонтирован плавный поворот радиусом $R_0 = 4 \cdot b_0 = 700$ мм из листовой стали. Внутренняя сторона поворота была опущена на величину $h = 20$ мм. Установка имела также систему подачи воды, обеспечивающую стационарный поток, ленточный питатель для равномерной загрузки сыпучих материалов в поток воды. Уклон желоба изменялся от 0,01 до 0,07; расход воды от 0,8 до 11,2 л/с, число Рейнольдса от 3100 до 26400; число Фруда всегда было больше 1, т.е. потоки были бурными.

Обработка результатов экспериментов показывает, что величина коэффициентов k_3 и $k_{3.т}$ для оптимальных режи-

мов и наиболее употребительных уклонов изменяется в пределах:

для угля ($i=0,025--0,08$) $k_3=0,94$, $k_{3.Т}=0,47--0,87$;

песчаника ($i=0,07--0,09$) $k_3=0,76$, $k_{3.Т}=0,48--0,61$;

для алюминиевой стружки 0--25 мм ($i=0,01--0,02$) $k_3=0,92$ $k_{3.Т}=0,25--0,45$

для чугунной стружки 0--10 мм ($i=0,02--0,03$) $k_3=0,75$, $k_{3.Т}=0,10--0,15$;

для стальной стружки 0--25 мм ($i=0,02--0,05$) $k_3=0,72$, $k_{3.Т}=0,10--0,20$.

Л и т е р а т у р а

1. Богомолов А.И., Михайлов К.И. Гидравлика. М., 1972.
2. Тютиков Г.Т., Руднев Г.С., Куприн А.И. Лабораторные и промышленные исследования местных сопротивлений при безнапорном гидротранспорте. "Изв. вузов. Горный журнал", 1962, № 6.
3. Куприн А.И. Уменьшение местных гидравлических сопротивлений при безнапорном гидротранспорте угля. "Гидравлическая добыча угля", 1969, 4.

А.И. Куприн, Е.К. Седых,
А.М. Тихонцов, В.Г. Янковец

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ БЕЗНАПОРНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА КРУПНОКУСКОВЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Безнапорный гидротранспорт является одним из основных звеньев гидромеханизации трудоемких и тяжелых процессов и используется, например, для удаления в отвалы грунта от места его выемки при строительстве гидротехнических сооружений, транспортировании металлической стружки и т.д.

Проблеме моделирования потоков, перемещающих твердые сыпучие материалы, посвящен ряд исследований, однако до сего времени нет четких рекомендаций по определению минимальных размеров модели, при которых масштабным эффектом можно пренебречь.

В настоящей статье описана разработанная авторами методика определения критического масштаба модели $\lambda_{кр.}$, начиная с которого процесс безнапорного гидротранспорта будет