

Раздел 1. «Металлургия. Технологии новых материалов»

УДК 669.162.266.21:669.02/.09

ГРНТИ 53.31.15

А.Н. СЕЛЕГЕЙ¹, В.П. ИВАЩЕНКО¹, В.И. ГОЛОВКО¹, С.Н. СЕЛЕГЕЙ¹,
Н.В. МИХАЙЛОВСКИЙ¹, Г.А. ПАПАНОВ²

¹Национальная металлургическая академия Украины, Украина, Днепр

²Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени
академика В. Лазаряна Украина, Днепр

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА СЫПУЧЕГО ГРУЗА ПО НАКЛОННЫМ ТЕЧКАМ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена вопросам аналитического определения продольного профиля ссыпания шихтовых материалов по наклонным течкам (лоткам), в частности бесконусных загрузочных устройств доменных печей. Расчеты, выполненные в работе, дают возможность определять кинематические и динамические параметры потока шихтовых материалов на наклонных лотках. Также, зная условия течения насыпного груза, появляется возможность вычислять максимально допустимый объемный расход шихтового материала, выпускаемого из бункера засыпного устройства при обеспечении отсутствия пересыпания материала через борта. В работе использован оригинальный подход с использованием уравнения Бернулли с учетом дополнительных внутренних сопротивлений при движении шихтовых материалов. Материалы статьи могут быть полезны инженерам, занимающимся проектированием металлургического оборудования и его эксплуатацией, а также студентам, обучающимся на металлургических и горнодобывающих специальностях.

Ключевые слова: доменная печь, загрузочное устройство, наклонная течка, шихтовый материал, лоток, расход шихты, скорость потока шихты.

На сегодняшний день существуют методы определения кинематических характеристик потока материалов выпускаемых из бункеров загрузочных устройств доменных печей. [1]. Используя эти параметры в дальнейшем, появляется возможность определить начальные параметры движения шихтовых материалов по наклонным стационарным течкам (лоткам), которые соединяют шихтовые бункеры БЗУ и вертикальную трубу, которая в свою очередь выполняет функцию направляющей потока шихты на вращающейся лоток.

Среди этих параметров следует отметить начальную высоту потока шихтовых материалов на течке (лотке), среднюю начальную скорость потока частиц. Это даст возможность эффективно применить теорию свободно-дисперсного движения потока шихтовых материалов для указанного участка тракта загрузки современной доменной печи.

Используя рассчитанные величины объемного расхода шихты Q и зная площадь выпускного отверстия шихтового бункера S , можно рассчитать среднюю скорость выхода шихтовых материалов из бункера БЗУ V :

$$V = \frac{Q}{S} \quad (1)$$

Считая объемный расход и среднюю скорость постоянными величинами на выходе из бункера и на входе на направляющую течку, воспользовавшись уравнением (1) можно определить начальную высоту засыпи на наклонной течке (лотке), которая соединяет шихтовый затвор и вертикальную трубу БЗУ.

Раздел 1. «Металлургия. Технологии новых материалов»

Течка имеет форму наклонного лотка с поперечным сечением, выполненным в виде полукруга (рис. 1.). Для определения физико-механических параметров движения шихты по течке было применено уравнение Бернулли [2] в виде:

$$h' + dz + \frac{V^2}{2g} = h' + dh' + \frac{(V + dV)^2}{2g} + dh_{\text{тр}} \quad (2)$$

Учитывая, что $dz = dx \cdot \sin \alpha$ (рис. 1) и проведя преобразования получим:

$$dx \cdot \sin \alpha + \frac{V^2}{2g} = dh' + \frac{(V + dV)^2}{2g} + dh_{\text{тр}} \quad (3)$$

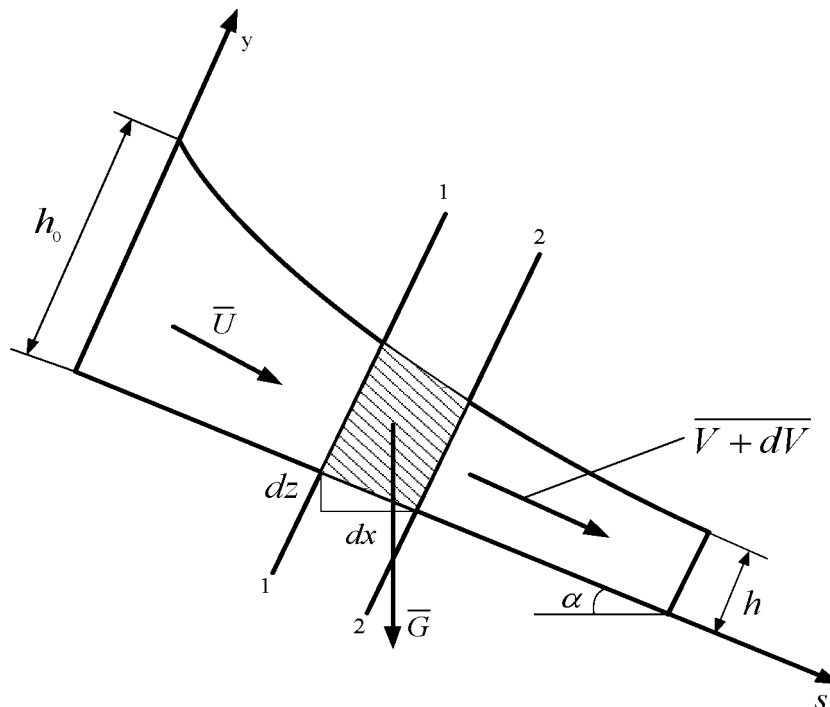


Рис. 1. Расчетная схема движения сыпучего груза по наклонной течке бесконусного загрузочного устройства доменной печи.

h' можно представить в виде $h' = h \cos \alpha$, проведя дифференцирование, получим $dh' = dh \cos \alpha$. Тогда (3) будет выглядеть

$$dx \cdot \sin \alpha + \frac{V^2}{2g} = dh \cos \alpha + \frac{(V + dV)^2}{2g} + dh_{\text{тр}} \quad (4)$$

Из [3] известно, что

Раздел 1. «Металлургия. Технологии новых материалов»

$$dh_{\text{тр}} = \frac{V^2 dx}{C^2 R_T} \quad (5)$$

Для формы канала, соответствующей поперечному сечению течи $R_T = \frac{D}{4}$, где D - диаметр поперечного сечения канала [4]. Если в выражение для гидравлического радиуса подставить радиус поперечного сечения течи уравнение (5) примет вид:

$$dh_{\text{тр}} = \frac{2V^2 dx}{C^2 R} \quad (6)$$

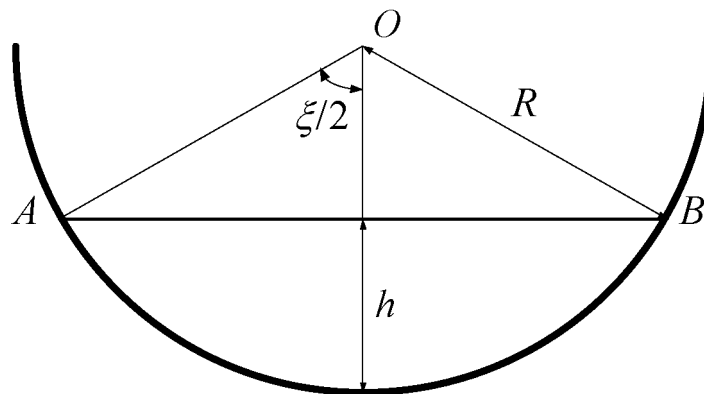


Рис. 2. Схема для определения площади поперечного сечения потока шихты.

Площадь сектора можно рассчитать согласно выражению:

$$S = \frac{2}{3} ah, \quad (7)$$

где a - длина соответствующей дуги, h - высота сегмента (рис. 2). Легко видеть, что $a = \xi R$, $\cos \frac{\xi}{2} = \frac{R-h}{R}$; $\xi = 2 \arccos \left(\frac{R-h}{R} \right)$. С учетом этого (7) примет вид:

$$S = \frac{4}{3} \arccos \left(\frac{R-h}{R} \right) \cdot R \cdot h \quad (8)$$

С учетом вышеизложенного, (1) примет вид:

$$V = \frac{3Q}{4 \arccos \left(\frac{R-h}{R} \right) \cdot R \cdot h} \quad (9)$$

Произведем подстановку выражения (9) в уравнение (4) с учетом (6):

Раздел 1. «Металлургия. Технологии новых материалов»

$$\begin{aligned}
 dx \sin \alpha + \frac{9Q^2}{32g \arccos^2\left(\frac{R-h}{R}\right) \cdot R^2 \cdot h^2} = \\
 = dh \cos \alpha + \frac{V^2 + 2VdV + dV^2}{2g} + \frac{2V^2 dx}{C^2 R}
 \end{aligned}
 \quad (10)$$

Продифференцируем (9) и после преобразований получим:

$$dV = \frac{3Q}{4R} \left[\frac{-1}{h^2 \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)} \left(\arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) + \frac{h}{R \sqrt{1 - \left(\frac{R-h}{R}\right)^2}} \right) \right] \quad (11)$$

Тогда (10) примет вид

$$\begin{aligned}
 dx \sin \alpha + \frac{9Q^2}{32g \arccos^2\left(\frac{R-h}{R}\right) \cdot R^2 \cdot h^2} = dh \cos \alpha + \\
 + \frac{9Q^2}{32g \arccos^2\left(\frac{R-h}{R}\right) \cdot R^2 \cdot h^2} + \frac{3Q}{4ghR \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)} \times \\
 \times \frac{3Q}{4R} \left[\frac{-1}{h^2 \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)} \left(\arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) + \frac{h}{R \sqrt{1 - \left(\frac{R-h}{R}\right)^2}} \right) \right] + \\
 + \frac{2V^2 dx}{C^2 R}
 \end{aligned}
 \quad (12)$$

Проведя преобразования, получим дифференциальное уравнение первого порядка:

Раздел 1. «Металлургия. Технологии новых материалов»

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\sin \alpha - \frac{9Q^2}{8C^2 R^3 h^2 \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)}}{\cos \alpha - \frac{9Q^2}{16R^2 g h \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)} \left(\frac{1}{h^2} + \frac{1}{R h \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{R-h}{R}\right)^2}} \right)} \quad (13)$$

Однако аналитическое решение данного уравнения весьма громоздко и вызывает трудности при рассмотрении задачи Коши. В связи с этим в работе предложено площадь «живого» сечения засыпи представить в виде линейной зависимости, применив уравнение регрессии.

Для проведения линейной регрессии зависимости площади «живого» поперечного сечения от высоты засыпи h (рис.2) составлена таблица соответствия значения поперечного сечения и высоты h , рассчитанная на основании (7). При расчетах радиус поперечного сечения точки принимался равным 0,5м. Высота h разбита 10 равных частей и изменяется от 0 до 0,5 м.

Таблица 2. Соответствие центрального угла и площади поперечного сечения засыпи

$h, \text{ м}$	0,006156	0,024	0,054	0,095	0,146	0,206	0,273	0,345	0,422	0,5
$S, \text{ м}^2$	0,000643	0,000507	0,017	0,038	0,071	0,117	0,174	0,241	0,315	0,393

Линейная регрессия приводит к следующему уравнению

$$S(h) = 0,8h - 0,03 \quad (14)$$

С учетом (14) (1) принимает вид

$$V = \frac{Q}{0,8h - 0,03} \quad (15)$$

Продифференцируем (15)

Раздел 1. «Металлургия. Технологии новых материалов»

$$dV = -\frac{0,8Q}{(0,8h - 0,03)^2} \quad (16)$$

Тогда (4) с учетом, что гидравлический радиус для полукруглого поперечного сечения $R_r = \frac{R}{2}$ принимает вид:

$$dx \sin \alpha = dh \cos \alpha - \frac{0,8Q^2}{(0,8h - 0,03)^3 g} + \frac{2Q^2}{C^2 R(0,8h - 0,03)} dx \quad (17)$$

Разделив переменные и произведя преобразования получим:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\sin \alpha - \frac{2Q^2}{C^2 R(0,8h - 0,03)}}{\cos \alpha - \frac{0,8Q^2}{(0,8h - 0,03)^3 g}} \quad (18)$$

Применим к решению (18) аппроксимацию Паде. Решение будем искать в виде [5]:

$$h(x) = hp + \frac{(h_0 - hp)^2}{h_0 - hp - a_2 x} \quad (19)$$

Коэффициент a_2 определяется выражением

$$a_2 = \frac{\sin \alpha - \frac{2Q^2}{C^2 R(0,8h_0 - 0,03)}}{\cos \alpha - \frac{0,8Q^2}{(0,8h_0 - 0,03)^3 g}} \quad (20)$$

Слагаемое hp определяется для случая, когда в выражении (20) $\frac{dh}{dx} = 0$. Т.е.

$$hp = \frac{0,03 + \frac{2Q^2}{C^2 R \sin \alpha}}{0,8} \quad (21)$$

Таким образом, по выражению (20) возможно определение профиля потока шихтовых материалов движущихся по наклонной течке. Аналитический расчет учитывает такие параметры как расход шихтовых материалов по объёму, а также гранулометрические характеристики движения частиц. Использование этих данных позволяет избежать таких

Раздел 1. «Металлургия. Технологии новых материалов»

расходов шихтовых материалов, при которых происходит пересыпание через борт лотка, что крайне нежелательно в условиях работы загрузочного устройства доменной печи. Кроме этого возможно определение скорости истечения материалов с конца наклонного лотка, что дает возможность определять траектории движения частиц шихты в колошниковом пространстве доменной печи и, как следствие, управлять рельефом засыпи поверхности шихтовых материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 A. Selegej, V. Ivaschenko, V. Chistyakov, V. Golovko. The Parameters of Burden flow from the bins of bell-less top charging system of blast furnaces. // Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2020, №3. – Р. 41-46
- 2 Кирия Р.В. Кинетический подход к выводу уравнений движения сыпучих сред // Вісник Дніпропетровського Державного Університету: Механіка: - Днепропетровск: ДГУ. - 1999. - Вып. 2. - С. 143-150.
- 3 Кирия Р.В. Уравнения движения сыпучего груза в перегрузочных узлах ленточных конвейеров // Сб. науч. тр. "Геотехническая механика". - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. - 1998. - Вып. № 6. - С. 116-122.
- 4 Константинов Ю.М. Гидравлика. - Киев: Вища школа, 1981. - 360 с.
- 5 Кирия Р.В., Богданов В.М. О движении сыпучей среды по наклонному лотку // Науковий вісник НГУ України. - Днепропетровск. - 2001. - Вып. № 3. - С. 47-51.

А.Н. Селегей, В.П. Иващенко, В.И. Головки, С.Н. Селегей, Н.В. Михайловский,
Папанов Г.А.

Дөңгелек көлденең қиманың көлбеу ағысы бойынша сусымалы жүк ағынының динамикалық параметрлерін анықтау

Аңдатпа. Мақала көлбеу ағындар (науалар) бойынша шихта материалдарының төгілуінің бойлық профилін, атап айтқанда домна пештерінің корпуссыз тиеу құрылғыларын аналитикалық анықтау мәселелеріне арналған. Жұмыста орындалған есептеулер көлбеу науалардағы шикіқұрам материалдары ағынының кинематикалық және динамикалық параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, үйілген жүктің ағу жағдайларын біле отырып, борттар арқылы материалдың төгілмеуі қамтамасыз етілген кезде, толтыру құрылғысының бункерінен шығарылатын шихта материалының максималды рұқсат етілген көлемдік шығынын есептеуге болады. Жұмыста шихталық материалдардың қозғалысы кезінде қосымша ішкі кедергілерді ескере отырып, Бернулли теңдеуін қолдана отырып, түпнұсқа тәсіл қолданылды. Мақала материалдары металлургиялық жабдықты жобалаумен және оны пайдаланумен айналысатын инженерлерге, сондай-ақ металлургиялық және тау-кен мамандықтарында оқитын студенттерге пайдалы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: домна пеші, жүктеу құрылғысы, көлбеу эструс, шихта материалы, науа, шихта шығыны, шихта ағынының жылдамдығы.

A. Selegej, V. Ivaschenko, V. Golovko, S. Selegej, N. Mychaylovsky, G. Papanov.

Determination of dynamic parameters of a bulk cargo flow by inclined flows of a circular cross sectionx

Abstract. The article is devoted to the issues of analytical determination of the longitudinal profile of pouring charge materials along inclined chutes (chutes), in particular, bell-less charging devices of blast furnaces. The calculations performed in this work make it possible to determine the

Раздел 1. «Металлургия. Технологии новых материалов»

kinematic and dynamic parameters of the flow of charge materials on inclined chutes. Also, knowing the conditions for the flow of bulk cargo, it becomes possible to calculate the maximum allowable volumetric flow rate of the charge material discharged from the hopper of the charging device while ensuring that there is no material pouring over the sides. The work uses an original approach using the Bernoulli equation taking into account additional internal resistances during the movement of charge materials. The materials of the article can be useful to engineers engaged in the design of metallurgical equipment and its operation, as well as to students studying in metallurgical and mining specialties.

Key words: blast furnace, loading device, an inclined heat charge material, the tray, the consumption charge, the rate of flow of the charge.