

Артюх В. Г., Грибков Э. П., Сорочан Е. Н.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОПРОКИДЫВАНИЯ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА

Artyukh V. G., Gribkov E. P., Sorochan E. N.

MATHEMATICAL MODEL OF OVERTURNING OXYGEN CONVERTER

Разработана методика расчета нагрузок в приводе кислородного конвертера с учетом динамических явлений. Математическая модель основана на разбиении металла на конечное множество элементарных объемов и определении их геометрических характеристик и центров тяжести с последующим интегрированием. Моменты в упругих звеньях привода были определены в динамической модели, основанной на решении дифференциальных уравнений движения масс системы. При этом были учтены пуск привода и установившееся движение системы. Сравнение экспериментальных и теоретических данных подтвердило адекватность предложенной методики.

Ключевые слова: конвертер кислородный, привод, момент опрокидывающий, нагрузки динамические, модель математическая.

Введение

Повышение работоспособности приводов является одним из перспективных направлений по дальнейшему развитию оборудования металлургического комплекса Украины. Решение этих задач представляется возможным на основе развития методов расчета и совершенствования конструкций приводов тяжело нагруженных металлургических машин, к которым относятся и кислородные конвертеры.

В ряде работ, в частности в работах [1–3], исследованы динамические явления в приводах кислородных конвертеров на основе многомассовой расчетной схемы. Одним из основных параметров, необходимым для динамической модели кислородного конвертера является внешние нагрузки. Определение опрокидывающих моментов сосудов произвольной формы с жидким металлом вследствие изменения формы жидкого металла и смещение центра тяжести при различных углах поворота сосуда является сложной задачей. При расчетах пользуются приближенными графоаналитическими методами, из которых наибольшее практическое применение получили универсальные методы П. Н. Аксенова, Д.А. Заводчикова и Е.А. Рохмана [4].

Цель

Целью работы является повышение работоспособности и совершенствование конструкций приводов кислородных конвертеров на основе развития методов автоматизированного расчета и проектирования. Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены такие основные задачи: уточнить инженерную методику расчета энергосиловых параметров процесса опрокидывания кислородных конвертеров; уточнить исходные предпосылки и дать экспериментальную оценку степени достоверности полученных теоретических решений; разработать комплекс математического и программного обеспечения по автоматизированному расчету технологических нагрузок в приводах кислородных конвертеров.

Математическая модель

Основной задачей при математическом моделировании процесса опрокидывания кислородного конвертера, а также процесса опрокидывания других емкостей с различного рода жидкостями, является определение расхода, а также величины момента, создаваемого оставшимся объемом жидкости в зависимости от текущего угла опрокидывания φ . Вследствие неоднозначности и громоздкости математического аппарата непосредственное решение данной задачи целесообразно осуществлять численно при помощи ЭВМ, а используемая в этом случае расчетная схема представлена на рис. 1.

Осуществив разбиение высоты конвертера на K_R элементарных объемов толщиной $\Delta y = H/K_R$ изменив множество получившихся усеченных конусов на такое же множество цилиндров определим геометрическую координату средней плоскости для каждого из них:

$$y_i = H - \Delta y(i - 0,5), \quad (1)$$

где i – порядковый номер элементарного объема с началом отсчета от верхней части ковша.

Для оптимизации расчета геометрических параметров каждого элементарного объема конвертер был разбит на три основные части, верхняя конусная, средняя цилиндрическая и нижняя конусная части.

Определив угол наклона образующей внутренней поверхности верхней части конвертера к вертикали α как:

$$\alpha = \arctg \frac{a}{(D - d_1) / 2}. \quad (2)$$

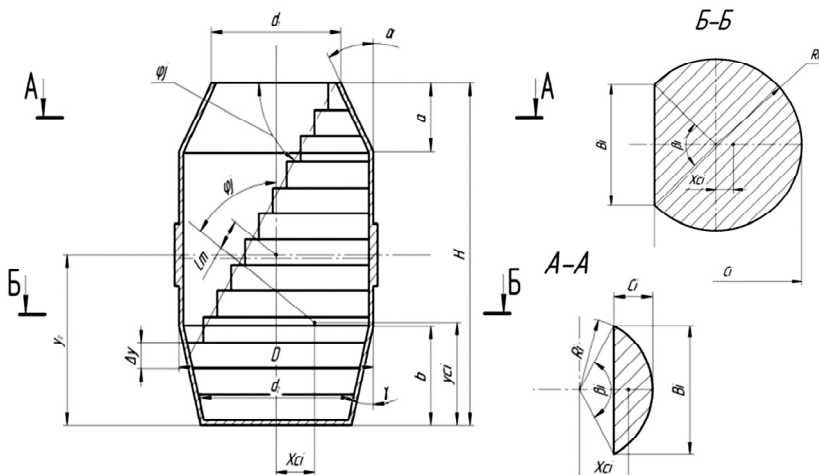


Рис. 1. Расчетная схема кислородного конвертера

Выразим значение радиуса средней плоскости для каждого элементарного объема верхней части конвертера следующем виде:

$$R_i = d_1 / 2 + (H - y_i) \operatorname{tga}. \quad (3)$$

С учетом текущего в j -й момент времени угла поворота сталеразливочного ковша φ_j определим геометрический параметр C_i , характеризующий форму и площадь зеркала стали на уровне: верхней конусной части

$$C_i = (H - y_i) \operatorname{tg}(\pi / 2 - \varphi) + (H - y_i) \operatorname{tg}(\varphi); \quad (4)$$

средней цилиндрической части

$$R_i = D / 2, \quad C_i = (H - y_i) \operatorname{tg}(\pi / 2 - \varphi) + (D - d_1) / 2, \quad (5)$$

нижней конусной части

$$\gamma = \operatorname{arctg}(D - d_1 / 2b), \quad R_i = D / 2 - y_i(\operatorname{tgy}),$$

$$C_i = (H - y_i) \operatorname{tg}(\pi / 2 - \varphi) - y_i \operatorname{tg}(\varphi). \quad (6)$$

Дальнейшее определение геометрических характеристик для каждого элементарного объема жидкой стали необходимо осуществлять дифференцировано в зависимости от соотношения параметра C_i и ра-

диуса внутренней поверхности R_i . Так, при $C_i \geq R_i$ сечение представляет собой сегмент с центральным углом β_i , основанием B_i и центром тяжести x_{ci} (рис. 1 сечение Б-Б) равными:

$$\begin{aligned} \beta_i &= 2 \arccos[(R_i - C_i)/R_i], & b_i &= 2R_i \sin(\beta_i/2), \\ F_i &= R_i 2\beta_i/2 - b_i (R_i - C_i)/2, & x_{ci} &= b_i^3 / (12F_i). \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогично для случая $R_i < c_i < 2R_i$ (рис. 1, сечение Б-Б):

$$\begin{aligned} \beta_i &= \arccos[(C_i - R_i)/R_i], & b_i &= 2R_i \sin(\beta_i/2), \\ F_i &= \pi R_i^2 - R_i \beta_i/2 + b_i(C_i - R_i)/2, & x_{ci} &= b_i^3 R_i / [12(\pi - F_i/\pi R_i^2) R_i^3]. \end{aligned} \quad (8)$$

И, наконец, при $2R \leq C_i$ элементарные объемы представляют собой полные замкнутые цилиндры с площадью $F_i = \pi R_i^2$ и координатой центра тяжести $x_{ci} = 0,0$.

С учетом известных площадей F_i может быть определен и весь объем стали V_j , соответствующий данному φ_i углу поворота:

$$V_j = \sum_{i=1}^{K_R} F_i \Delta y, \quad (9)$$

а с учетом геометрических координат центров тяжести элементарных объемов могут быть определены и координаты центра тяжести всей оставшейся стали:

$$y_{ci} = \sum_{i=1}^{K_R} F_i \Delta y \frac{y_i}{V_j}, \quad x_{ci} = \sum_{i=1}^{K_R} F_i \Delta x \frac{x_i}{V_j}, \quad (10)$$

следующему величина опрокидывающего момента в данный момент времени, т.е. при данном угле поворота φ_j составит :

$$\begin{aligned} M_j &= G_j I_{mj} = V_j \rho (y_0 - y_{cj} - x_{cj} / \operatorname{tg} \varphi) \sin \varphi = \\ &= V_j \rho \left[(y_0 - y_{cj}) \sin \varphi - x_{cj} \cos \varphi \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где G_j, Lm_j – вес оставшейся стали и плечо приложения относительно оси вращения (рис. 1).

С достаточной для практических расчетов точностью исследование динамических процессов в приводе механизма опрокидывания конвертера можно проводить по приведенной двухмассовой системе с одной степенью свободы. Приведение нагрузок и параметров в данном случае будем осуществлять к валу механизма поворота конвертера.

Уравнения движения системы имеют вид:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 - c(\varphi_2 - \varphi_1) = M_1; \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 - c(\varphi_2 - \varphi_1) = -M_2 \end{cases}, \quad (12)$$

где φ_1, φ_2 – углы поворота инерционных масс I_1, I_2 , рад ;

c – коэффициент жесткости, Н · м/рад .

Момент опрокидывания конвертера M_2 определяется как функция от угла поворота корпуса конвертера φ по зависимости (11).

Момент M_1 создается электродвигателем механизма опрокидывания конвертера.

Решение системы уравнений (12) дает исходное дифференциальное уравнение для определения относительного угла закручивания $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, который после преобразований равен:

$$\varphi = M_2 / [I_2(p^2 - \omega^2)] (1 - \omega/p) + M_1 / I_1 p^2, \quad (13)$$

где $p = \sqrt{c(I_1 + I_2)/(I_1 I_2)}$ – собственная частота колебаний системы.

Величина восстанавливающего момента в упругой связи будет определяться как $M = c\varphi$.

Рассмотренные зависимости (12)–(13) позволяют с достаточной для практических расчетов точностью приближения исследовать динамические нагрузки в вале привода механизма поворота конвертера.

Во время пуска, то есть в период от начала движения первой массы до начала движения второй (τ_1) момент в упругой связи находится из условия равенства $M_{12} = M_2$, т.е.

$$M_{12} = \varphi_1 c = c M_1 / I_1 p^2 (1 - \cos pt); \quad \tau_1 = \frac{1}{p} \arccos((M_1 - M_2) / M_1). \quad (14)$$

Уравнения (12)–(14) в сочетании с математической моделью для определения нагрузок при опрокидывании составили полный алгоритм для определения динамических нагрузок в промежуточном вале привода кислородного конвертера.

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований использовалась лабораторная установка, которая находится на базе Донбасской государственной машиностроительной академии. Во время проведения экспериментальных исследований конвертер наполнялся водой, которая близка по своим инерционным характеристикам к жидкой стали, и производился поворот конвертера до полного слива, при этом производилась запись сигнала с тензодатчиков, наклеенных на упругий вал привода. Тарировку производили путем нагружения конвертера заданным усилием от крана через динамометр (рис. 2).

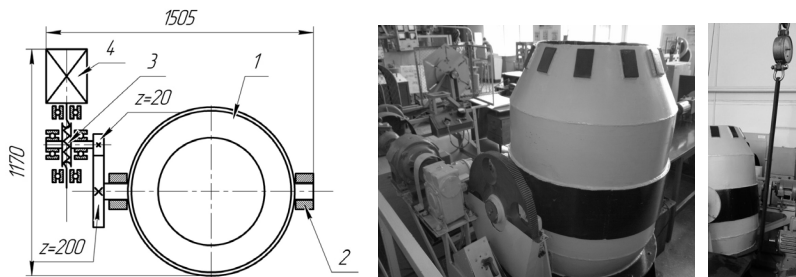


Рис. 2. Лабораторная установка: 1 – конвертер; 2 – опоры; 3 – червячный редуктор; 4 – электродвигатель

Результаты исследования

Максимальный момент кручения при экспериментальном исследовании равен 2,7 кНм, при теоретическом расчете 2,5 кНм. Погрешность расчета не превысила 7,4%, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования процесса опрокидывания кислородного конвертера подтвердили достоверность разработанной математической модели, при этом погрешность расчета не превысила 7,4%, что делает правомерным её использование при проектных расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванченко Ф. К. Динамика металлургических машин / Ф. К. Иванченко, В. А. Красношапка. – М. : Металлургия, 1983. – 285 с.
2. Большаков В. И. Динамические нагрузки разветвленной механической системы привода наклона конвертера / В. И. Большаков, В. В. Буцукин // Защита металлургических машин от поломок: Сб. науч. тр. – Вып. 2. – Мариуполь: ПГТУ, 1997. – С. 16-24.
3. Большаков В. И. Особенности определения динамических нагрузок в разветвленных приводах конвертеров / В. И. Большаков, В. В. Буцукин // Защита металлургических машин от поломок: Сб. науч. тр. – Вып. 5. – Мариуполь : ПГТУ, 2000. – С. 48-59.
4. Гребеник В. М. Расчет металлургических машин и механизмов / В. М. Гребеник, Ф. К. Иванченко, В. И. Ширяев. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 448 с.

REFERENCES

1. Ivanchenko F.K. Dinamika metallurgicheskikh mashin / F. K. Ivanchenko, V. A. Krasnoshapka. – Moscow. : Metallurgija, 1983. – 285 p.
2. Bolshakov V.I. Dinamicheskie nagruzki razvetvlennoj mehanicheskoy sistemy privoda naklona konvertera / V. I. Bol'shakov, V. V. Bucukin // Zashhita metallurgicheskikh mashin ot polomok: Sb. nauch. tr. – Vyp. 2. – Mariupol': PGU, 1997. – pp. 16-24.
3. Bol'shakov V.I. Osobennosti opredeleniya dinamicheskikh nagruzok v razvetvlennykh privodakh konverterov / V. I. Bol'shakov, V. V. Bucukin // Zashhita metallurgicheskikh mashin ot polomok: Sb. nauch. tr. – Vyp. 5. – Mariupol': PGU, 2000. – pp. 48-59.
4. Grebenik V.M. Raschet metallurgicheskikh mashin i mehanizmov / V. M. Grebennik, F. K. Ivanchenko, V. I. Shirjaev. – K.: Vyshha shk. Golovnoe izd-vo, 1988. – 448 p.

Артюх В. Г., Грибков Е. П., Сорочан О. М. Математична модель процесу перекидання кисневого конвертера.

Розроблено методику розрахунку навантажень у приводі кисневого конвертера з урахуванням динамічних явищ. Математична модель базується на розбитті металу на кінцеву множину елементарних об'ємів і визначенні їх геометричних характеристик і центрів тягарів. Моменти в пружних ланках привода були визначені в динамічній моделі, заснованій на вирішенні диференціальних рівнянь руху мас системи. При цьому було враховано пуск привода і його сталій режим руху. Порівняння експериментальних і теоретичних даних підтвердило адекватність запропонованої методики та можливість її застосування при проектних розрахунках.

Ключові слова: конвертер кисневий, привід, момент перекидаючий, навантаження динамічні, модель математична.

Artyukh V.G., Gribkov E.P., Sorochan E.N., Mathematical model of overturning oxygen converter.

The purpose of the work is increasing the efficiency and improving the design of oxygen converters' drives based on the development of calculation and design automated methods. Achievement of this objective is possible by solving the following problems: clarification the engineering methodology for calculation of overturning moment, experimental evaluation of the reliability of theoretical solutions, development mathematical model and software for automated calculation of process loads in oxygen converters' drives.

The mathematical model is based on discretization of the metal by a finite set of elementary volumes and determination of their geometric characteristics and center of gravity. The method takes into account changes in the external loads, starting of a drive and its functioning in the operating conditions. Moments in the elastic links of the drive have been identified in a dynamic model based on the solution of differential equations of mass motion.

Comparison of experimental and theoretical results confirm the adequacy of the proposed method.

The proposed dynamic model of the drive oxygen converter is more precise due to taking into account the real mechanism of changing the overturning moment. This model may be implemented in the design, because it determines the load-bearing capacity and durability of the drive components of the converter.

Keywords: *oxygen converter, drive, overturning moment, dynamic loading, mathematical model.*

Артюх В.Г. – д-р. техн. наук, доц., зав.каф. «Сопротивление материалов»
Приазовского государственного технического университета, г. Мариуполь,
Украина

e-mail: ken46@yandex.ua

Грибков Э.П. – канд. техн. наук, доц., докторант Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск, Украина

e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Сорочан Е.Н. – старший преподаватель Приазовского государственного технического университета, г. Мариуполь, Украина

e-mail: ken46@yandex.ua