

**Т.В. ПОЛИЩУК**, ОАО „Азовобщешмаш”, г. Мариуполь,  
**Н.Н. ТКАЧУК**, НТУ „ХПИ”

## **К ВОПРОСУ О КИНЕМАТИЧЕСКОМ И СИЛОВОМ АНАЛИЗЕ МЕХАНИЗМА НАКЛОНА ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ**

У статті запропоновано модель механізму нахилу плавильної печі. Для одного з варіантів механізму визначені закон руху та розподіл зусиль у його ланках.

In the paper a model of furnace tilting mechanism is offered. Motion of its links as well as forces acting in the mechanism are determined for one particular configuration.

**Введение.** Создание и внедрение в производство уникального оборудования всегда было сложной задачей, требующей от проектировщика значительных усилий и большой затраты времени. В особенности это относится к габаритным металлоемким конструкциям. Проверка тех или иных инженерных и технических решений путем изготовления и испытания опытного образца для них является слишком затратной и неоправданной, что в еще большей степени повышает ответственность конструкторов и расчетчиков и выдвигает повышенные требования к точности расчетных моделей и к качеству проработки проекта на всех этапах его осуществления.

Существенной трудностью при решении этой задачи является отсутствие или неприменимость стандартных методик анализа сложных механических систем и синтеза параметров создаваемых уникальных механизмов [1]. Рассмотрению подлежат множество факторов и процессов, степень влияния каждого из которых на работоспособность проектируемого объекта следует установить с большой точностью. Подобная многофакторность требует разработки комплексной модели, основанной на подтвержденных точными расчетами предположениях. Помимо этого расчетная модель должна быть легко параметризуемой и приспособляемой к возможным конструктивным изменениям исследуемой конструкции.

Выдвигаемым к модели требованиям можно удовлетворить, придав расчетной схеме модульную структуру. Добавлением и изменением отдельных расчетных модулей такую систему можно постепенно детализировать и уточнять с учетом ранее полученных результатов.

Представленная в этой статье модель наклонной платформы плавильной печи, разрабатываемой в ГСКТИ для ЗАО „АзовЭлектроСталь”, включает кинематику механизма наклона печи и расплава и предназначена для определения усилий в данной конструкции в процессе ее эксплуатации.

**Постановка задачи.** Основным назначением исследуемой конструкции, как и рассмотренной ранее [2], является осуществление наклона печи при выполнении двух производственных операций: слива шлака и готовой расплавленной стали. Помимо этого на наклонной платформе монтируются электроды, система

охлаждения и прочее оборудование. Несущим элементом конструкции является сварная рама **1**, к которой крепится печь **2**, опирающаяся на коромысло **3** с цилиндрическим профилем, перекатывающееся по основанию **4**. Наклон платформы и вместе с ней плавильной печи регулируется с помощью наклонного гидроцилиндра **5**, усилия от которого передаются на раму **1** посредством шарнира **6** (рис.1). Требуется установить зависимость между величиной угла наклона плавильной печи и ходом поршня, а также определить усилия в элементах конструкции при различных значениях угла наклона платформы. Эту задачу можно решить, представив соединенные между собой раму, печь и коромысло одним абсолютно жестким телом. При малых скоростях движения поршня гидроцилиндра инерционным движением расплава можно пренебречь, равно как и инерционными составляющими усилий, а потому искомые силы находятся из условий статического равновесия конструкции в различных ее положениях.

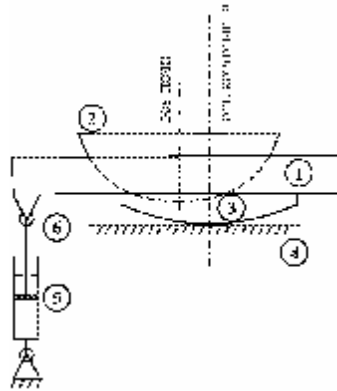


Рис. 1. Устройство механизма наклона плавильной печи

**Кинематика.** Движение платформы определяется ходом поршня гидроцилиндра, а также характером перекатывания коромысла по основанию. Первоначально предполагается, что это качение происходит без проскальзывания. В этом случае система „шток поршня – наклонная платформа” обладает только одной степенью свободы. Ее положение определяется одним из взаимосвязанных параметров:  $u$  – перемещением поршня или  $\alpha$  – углом наклона платформы (рис. 2).

Для определения зависимости между  $u$  и  $\alpha$ , а также положения элементов конструкции при различных их значениях рассмотрим, следуя [1], помимо глобальной неподвижной

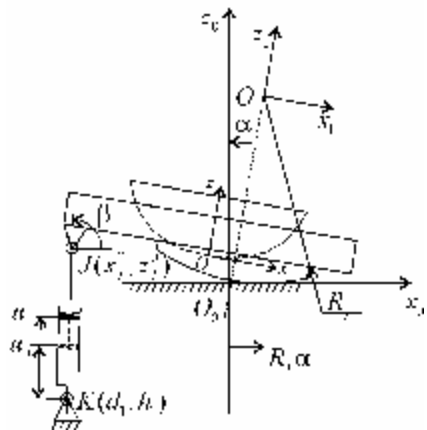


Рис. 2. Положение звеньев механизма при наклоне

системы координат  $O_0x_0z_0$ , ось  $O_0z_0$  которой пересекает мгновенную ось вращения коромысла в исходном вертикальном положении плавильной печи (см. рис. 2), локальную систему  $O_1x_1z_1$ , жестко связанную с платформой. Ее центр  $O_1$  совпадает с центром кривизны

цилиндрического профиля коромысла (см. рис. 2). Для удобства будем рассматривать однородные координаты точек в этих системах координат, связанные преобразованием

$$r^0 = \begin{bmatrix} x^0 \\ z^0 \\ 1 \end{bmatrix} = M_{01} r^1 = M_{01} \begin{bmatrix} x^1 \\ z^1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

где  $M_{01}$  – матрица преобразования координат, равная

$$M_{01} = M_{shift}(R_f \alpha) \cdot M_{rot}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & R_f \cdot \alpha \\ 0 & 1 & R_f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $M_{shift}$  отвечает перемещению центра вращения платформы  $O_1$  на величину  $R_f \alpha$ , а  $M_{rot}$  – повороту платформы на угол  $\alpha$ . В этих обозначениях легко найти траекторию точки шарнира  $J$ , которая в локальной системе  $O_1 x_1 z_1$  имеет постоянные координаты

$$r_J^1 = \begin{bmatrix} x_J^1 \\ z_J^1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Отсюда

$$r_J^0(\alpha) = M_{01}(\alpha) \cdot r_J^1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot x_J^1 + \sin \alpha \cdot z_J^1 + R_f \cdot \alpha \\ -\sin \alpha \cdot x_J^1 + \cos \alpha \cdot z_J^1 + R_f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_J^0(\alpha) \\ z_J^0(\alpha) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Зная положение шарнира  $J$ , легко найти величину хода цилиндра, отвечающую заданному значению угла наклона плавильной печи:

$$u + u_0 = \sqrt{(x_J^0 - d_1)^2 + (z_J^0 - h_1)^2}. \quad (4)$$

Вместе с ней определяется угол наклона гидроцилиндра

$$\cos \beta = \frac{x_J^0 - d_1}{\sqrt{(x_J^0 - d_1)^2 + (z_J^0 - h_1)^2}}. \quad (5)$$

**Равновесие расплава.** При определении усилий, действующих в конструкции, необходимо знать положение и объем расплава в печи для всех значений угла наклона  $\alpha$ . Следует учитывать, что вместе с перемещением расплава внутри печи изменяется положение его центра масс, а при сливе шлака или стали и их общая масса. Расплав в печи перемещается при выполнении нескольких производственных операций. Во время плавки печь пребывает в вертикальном положении, а потому первоначально уровень расплава в ней перпендикулярен оси печи. Расстояние от поверхности расплавленного металла до дна ванны принимает номинальное значение  $h_0$  (рис. 3). Затем для слива шлака печь наклоняется влево. До тех пор, пока уровень расплава не достиг шлаковой дверцы, расположенной на высоте  $H_0$  от дна ванны, объем содержимого не меняется (1-й этап). После слива определенного объема шлака (2-й этап) производится наклон всей конструкции вправо (3-й этап) до тех пор, пока уровень изобавленной от шлака стали не достигает на правой стенке ванны высоты  $H_1$ , на которой производится выпуск жидкой стали (этап 4). При этом в печи остается некоторое количество жидкой стали. Для слива шлака печь наклоняется на  $-15^\circ$ , а для слива расплава – на  $10^\circ$ . Полностью печь освобождается от жид-

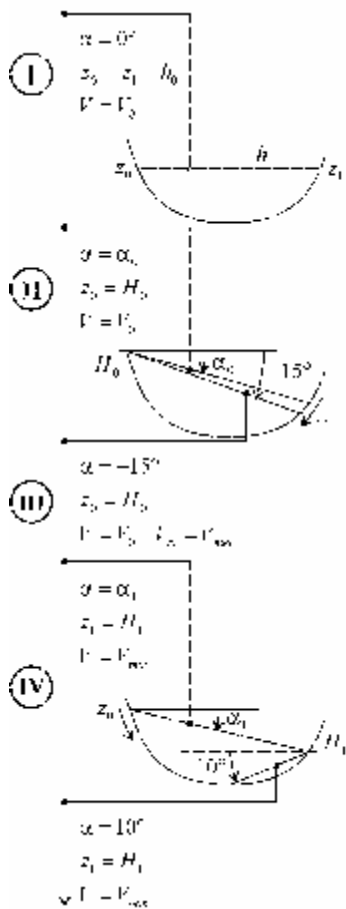


Рис. 3. Этапы рабочего цикла печи и положения расплава в различные моменты времени

кой стали при этом положении центра масс расплава и его объема на всех этапах рабочего процесса сводится к рассмотрению двух различных ситуаций. Первая – уровень расплава перемещается с изменением угла наклона печи, его объем не меняется (слив не производится). Вторая – происходит слив либо шлака, либо слив стали. В этом случае на левом либо на правом краю ванны уровень расплава остается на неизменной высоте, а его объем уменьшается. Очевидно, что 1-ый случай отвечает 1-ому и 3-ему этапам, а второй случай – 2-ому и 4-ому.

Ниже приводится решение поставленной задачи для случая, когда стенка печи является поверхностью вращения, профиль которой задается в локальной системе координат печи  $Oxz$  образующей  $x, r = \zeta(z)$  (рис. 4). Начало отсчета этой системы т.  $O$  совпадает с дном печи так, что  $\zeta(0) = 0$ . При наклоне печи на угол  $\alpha$  свободная поверхность расплава представляет собой часть плоскости, наклоненной относительно радиальной оси печи  $Or$  на этот угол, ограниченную стенками ванны. В плоскости  $Oxz$  уровень расплава представляется отрезком  $A_0A_1$ .

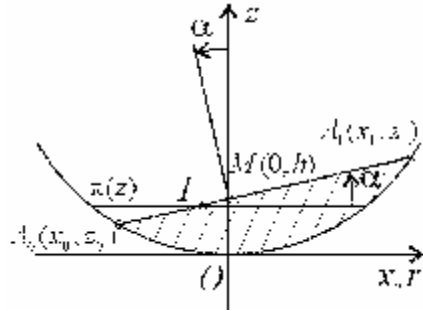


Рис. 4. Профиль печи и положение уровня

Его пересечение с центральной осью печи т.  $M$  имеет координаты  $(0, h)$ . Расплав при этом занимает объем, ограниченный стенками ванны и свободной поверхностью.

Сечения этой фигуры плоскостями, перпендикулярными оси  $Oz$ , представляют собой сегменты окружности радиуса  $\zeta(z)$ , вид которых представлен на рис.5. Различной штриховкой на нем обозначены сегменты  $S^+(z)$  и  $S^-(z)$ , отвечающие положительным и отрицательным значениям угла  $\alpha$ . Следует учитывать, что в зависимости от знака  $\alpha$  расплав в плоскости сечения располагается либо справа от точки  $I$ , либо слева. Этим определяется действительная площадь сечения  $S(z)$  и положение его центра масс.

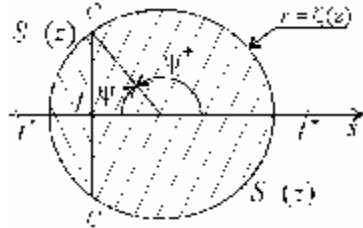


Рис. 5. Сечения

На рисунке также указаны два возможных положения точки  $I$  пересечения прямой  $A_0A_1$  с плоскостью  $\pi(z)$ , каждое из которых отвечает в зависимости от знака  $\alpha$  либо ситуации, в которой пересечение пусто, либо случаю, когда сечение занимает всю площадь круга.

Определим форму сечения  $S(z)$  для всех значений  $z > 0$  и  $\alpha$ . Для этого определим функцию

$$\psi(z) = \arccos \left[ \frac{(z-h) \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{sign}(\alpha)}{\zeta(z)} \right], \quad (6)$$

доопределив здесь

$$\arccos \gamma := \begin{cases} 0, & \gamma > 1 \\ \pi, & \gamma < -1 \end{cases}.$$

С ее помощью можно записать выражение для  $S(z)$ , справедливое при всех значениях  $z$  и  $\alpha$ :

$$S(z) = \zeta^2(z) \left[ \psi(z) - \frac{1}{2} \sin 2\psi(z) \right]. \quad (7)$$

Аналогично получается выражение для координаты  $x_c^S(z)$  центра масс сечения расплава, в котором учитывается зависимость его положения относительно хорды  $CC$  от знака угла  $\alpha$ :

$$x_c^S(z) = \frac{2}{3} \frac{\zeta^3(z) \sin^3 \psi(z)}{S(z)} \operatorname{sign}(\alpha). \quad (8)$$

Используя соотношения (7-8) для сечений, можно определить объем всего расплава и положение его центра масс:

$$V = \int_0^H S(z) dz = \int_0^H \zeta^2(z) \left[ \psi(z) - \frac{1}{2} \sin 2\psi(z) \right] dz, \quad (9)$$

$$x_c^I = \frac{1}{V} \int_0^H x_c^S(z) S(z) dz = \frac{\operatorname{sign}(\alpha)}{V} \int_0^H \frac{2}{3} \zeta^3(z) \sin^3 \psi(z) dz, \quad (10)$$

$$z_c^I = \frac{1}{V} \int_0^H z S(z) dz = \frac{1}{V} \int_0^H z \zeta^2(z) \left[ \psi(z) - \frac{1}{2} \sin 2\psi(z) \right] dz, \quad (11)$$

где  $H = \max\{z_0, z_1\}$ .

Формулы (9)-(11) применимы в обеих рассматриваемых ситуациях, различие между которыми состоит лишь в том, как определяется положение расплава при заданном значении угла наклона печи. Необходимо решить задачу вычисления координат точек  $A_0$  и  $A_1$  в обоих случаях.

В первом случае, когда в процессе наклона печи слив не производится, уровень расплава находится из условия постоянства объема содержимого печи. Считая, что расплав при этом всегда покрывает дно ванны, можно записать соотношения, связывающие координаты точек  $A_0$  и  $A_1$  со значением  $h$ :

$$\frac{(z_0 - h) \operatorname{ctg} \alpha}{\zeta(z_0)} = -1, \quad (12)$$

$$x_0 = -\zeta(z_0), \quad (13)$$

$$\frac{(z_1 - h) \operatorname{ctg} \alpha}{\zeta(z_1)} = 1, \quad (14)$$

$$x_1 = -\zeta(z_1). \quad (15)$$

В этом случае равенство (9), в котором  $V$  - заданное значение объема, можно рассматривать как уравнение относительно неизвестной величины  $h > 0$ . Очевидно, что правая часть этого уравнения не выражается явно через  $h$ , а потому для его решения необходимо применять численную процедуру.

По найденному значению  $h$  с помощью формул (12)-(15) определяется положение уровня расплава, а затем по формулам (10)-(11) и положение центра масс содержимого печи.

Во втором случае, когда производится либо слив шлака влево, либо выпуск жидкой стали вправо, искомые величины получаются проще.

При сливе шлака имеем:

$$z_0 = H_0, x_0 = -\zeta(H_0), \quad (16)$$

$$h = H_0 + \zeta(H_0) \operatorname{tg} \alpha. \quad (17)$$

$z_1$  при этом находится из уравнения

$$\frac{(z_1 - h) \operatorname{ctg} \alpha}{\zeta(z_1)} = \operatorname{sign}(h), \quad (18)$$

в котором множителем  $\operatorname{sign}(h)$  определяется, покрывает ли расплав дно ванны, а также то, на какой стороне профиля стенок печи находится точка  $A_1$ .

Аналогично для слива жидкой стали можно записать:

$$z_1 = H_1, x_1 = \zeta(H_1), \quad (19)$$

$$h = H_1 - \zeta(H_1) \operatorname{tg} \alpha, \quad (20)$$

$$\frac{(z_0 - h) \operatorname{ctg} \alpha}{\zeta(z_0)} = -\operatorname{sign}(h). \quad (21)$$

Как и в первом случае, искомые величины вычисляются с помощью соотношений (9)-(11), с той разницей, что в равенстве (9)  $V$  выступает как переменная.

Приведенные выше соотношения позволяют определять на всех рассматриваемых этапах работы печи величину объема расплава и его положение. Вместе с ними вычисляются компоненты радиус-вектора центра масс расплава

в локальной системе координат  $Oxz$  :

$$\bar{\rho}_l(\alpha) = [x_c(\alpha) + d_b; \quad z_c(\alpha) + h_b; \quad 1]^T.$$

**Статика.** В плоскости симметрии конструкции на наклонную платформу действуют следующие силы: вес печи и расплава  $Mg$ , усилие со стороны гидрорцилиндра  $N_j$  в точке  $J$  и две составляющие  $N$  и  $T$  реакции основания в точке его соприкосновения с коромыслом (рис. 6). При заданном угле наклона платформы координаты центра масс печи и расплава в системе координат  $O_1x_1z_1$  определяются как

$$\bar{\rho}_M^{-1} = \frac{\bar{\rho}_f m_f + \bar{\rho}_l(\alpha) m_l}{M}, \quad (22)$$

где  $m_f$  – вес печи;  $m_l = \rho V$  – вес расплава;  $M = m_l + m_f$  – общий вес конструкции.

Соответственно, координаты радиус-вектора центра масс наклонной платформы и печи с расплавом определяется как

$$\bar{\rho}_M^0 = \begin{bmatrix} x_M^0 \\ z_M^0 \\ 1 \end{bmatrix} = M_{01} \bar{\rho}_M^{-1}.$$

Условия равенства нулю суммы сил и создаваемого этими силами момента позволяет записать систему 3-х уравнений относительно неизвестных усилий  $N_j$ ,  $N$  и  $T$  :

$$\begin{cases} N - Mg + N_j \sin \beta = 0; \\ T + N_j \cos \beta = 0; \\ N \cdot (R_f \alpha) - Mg \cdot x_M^0 + N_j \cdot (x_j^0 \sin \beta - z_j^0 \cos \beta) = 0, \end{cases} \quad (23)$$

откуда они находятся как функции угла наклона  $\alpha$ .

**Результаты расчетов.** В рамках изложенной выше модели был проведен кинематический и силовой расчет одного варианта печи с проектными значениями параметров. Была построена диаграмма зависимости величины

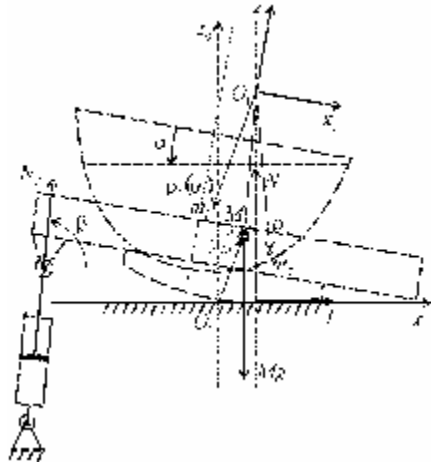


Рис. 6. Силы, действующие на наклонную платформу печи



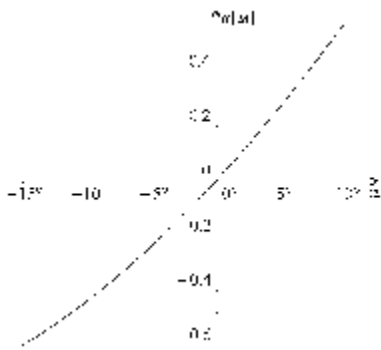


Рис. 7. Диаграмма зависимости величины хода поршня от угла наклона печи

отметить перемену знака усилия, развиваемого в гидроцилиндре, требуемого

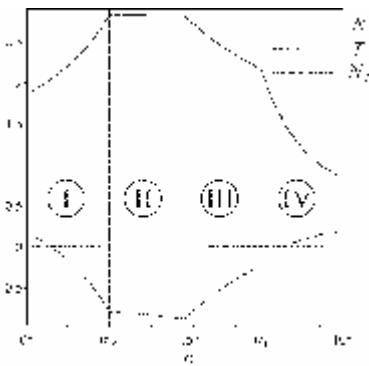


Рис. 8. Величины усилий  $N_J$ ,  $N$  и  $T$ , отнесенные к сухому весу конструкции, на всех этапах рабочего цикла

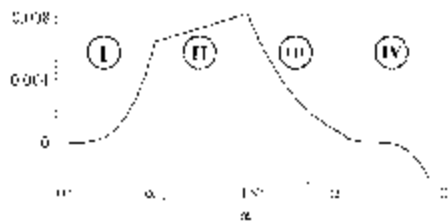


Рис. 9. Отношение касательной компоненты реакции в точке перекаатывания к нормальной при различных углах наклона

хода поршня гидроцилиндра от требуемого угла наклона печи (рис. 7). Вследствие того, что точка размещения шарнира  $J$  отстоит на достаточно большом расстоянии от оси коромысла, и малости углов наклона эта зависимость носит почти линейный характер. По значительно более сложному закону изменяются усилия в механизме, возникающие в процессе его работы. На рис.8 представлены полученные величины усилий  $N_J$ ,  $N$  и  $T$ , отнесенные к сухому весу конструкции без расплава  $m_f \cdot g$  на всех этапах рабочего цикла. Следует отметить перемену знака усилия, развиваемого в гидроцилиндре, требуемого для удержания печи с расплавом в равновесии, которая происходит при наклоне печи.

Другой характеристикой, на которую следует обратить внимание, является отношение касательной компоненты  $T$  реакции в точке перекаатывания к нормальной  $N$ , значения которой при различных углах наклона приведены на диаграмме (рис. 9). Как видно, боковое усилие в точке сопряжения коромысла с основанием невелико по сравнению с прижимающей силой. В связи с этим можно предположить, что сухого трения должно быть достаточно, чтобы предотвратить проскальзывания движущихся частей конструкции даже при сравнительно небольших значениях коэффициента трения.

**Заклучение.** Предложенная в статье математическая модель для исследования кинематики и определения усилий в сопряжениях механизма наклона плавильной печи позволяет проанализировать исследуемую конструкцию лишь в рамках механики твердого тела. Вместе с тем она удовлетворяет оговоренным вначале требованиям. В частности, она легко параметризуема, пригодна для проведения оценочных расчетов и адаптируема к возможным изменениям в конструкции проектируемого устройства. Получаемые с ее применением результаты могут быть использованы как непосредственно при проектировании, так и в качестве исходных данных в рамках более общей модели.

Построение модели синтеза, охватывающей как составной блок предложенную в статье модель анализа, является направлением дальнейших исследований.

**Список литературы:** 1. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин. Учеб. для ВТУЗов. – М.: Наука, 1988. – 640 с. 2. *Полищук Т.В., Пеклич М.М., Ткачук Н.Н.* Кинематический и силовой расчет механизма наклона плавильной печи // Механіка та машинобудування. – 2007.– № 1. – С.100-106.

*Поступила в редколлегию 21.09.2007*

УДК 621.833.031

**А.Г. ПРИЙМАКОВ**, канд. техн. наук, Харьковский университет  
воздушных сил Вооруженных сил Украины,  
**А.В. УСТИНЕНКО**, канд. техн. наук, НТУ „ХПИ”,  
**Г.А. ПРИЙМАКОВ**, бакалавр механики, НТУ „ХПИ”

## **О СТОЙКОСТИ СМАЗОЧНЫХ ПЛЕНОК, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ МАССОПЕРЕНОС В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ**

Мастильна плівка, що покриває несучі поверхні зубців, змодельована як деяка оболонка, підкріплена основою, на яку вона нанесена. Розроблено математичний апарат, що дозволяє визначити параметри стійкості граничних мастильних плівок в силових зубчастих передачах.

Lubricating tape, covering the teeth surfaces, is modelled as some shell, supported basis which it is inflicted on. A mathematical model, allowing to define the parameters of firmness of limits lubricating tapes in the power gearings, is developed.

**Введение.** В процессе зацепления в силовых зубчатых передачах, в частности волновых, возникает интересная научно-техническая проблема обеспечения стойкости смазочной пленки в зоне контакта зубьев. Поскольку в процессе эксплуатации силовых передач идет активный процесс массопереноса в зоне пятен контакта, то смазочную пленку можно представить как некоторый вязко-текучий субстрат, наполненный частицами износа зубьев.

*Анализ литературных источников* [1-11] показывает, что решение этой научно-технической проблемы не имеет аналогов ни в отечественной, ни в зарубежной литературе.