

УДК 622.002.5:517:531.112

*А. В. ЛОКТИОНОВ*

*Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь*

## **ТЕОРИЯ РАСЧЕТА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Проанализированы методы расчета кинематических параметров режущего инструмента пространственных исполнительных механизмов. Установлено, что кинематические углы резцов исполнительных механизмов в процессе резания не соответствуют геометрическим углам режущего инструмента. Предложены аналитические зависимости для расчета кинематических углов резцов в процессе резания и исходные конструктивные и кинематические параметры исполнительных механизмов.

Расчет задних углов, выражающих реальную величину зазора между поверхностью инструмента и поверхностью резания, непосредственно связан с изучением перемещения инструмента и обрабатываемого объекта в процессе резания. Задний угол движения  $\alpha_d$  измеряется между вектором относительной скорости резания и касательной к траектории сложного пространственного движения инструмента в заданной точке [1, 2].

На чертежах резцов указываются геометрические параметры, полученные при заточке. При работе механизма приходится изменять положение режущего лезвия относительно обрабатываемого массива, а в зависимости от положения вершины резца изменяются направления вектора скорости и геометрические параметры резцов в состоянии движения, которыми определяется процесс резания и износ инструментов.

Для использования закономерностей движения резцов при разработке исполнительных механизмов определяются следующие расчетные характеристики: скорость движения инструмента, его ориентация относительно траектории движения и вытекающие из требований кинематики углы заточки (или установки) инструмента.

При обработке массива кинематические углы резцов не должны превышать их геометрические значения. Иначе массив разрушается боковыми и задними гранями резцов, увеличиваются расход режущего инструмента, усилия и мощность резания, что является одной из причин малоэффективной работы машин.

Аналитическому расчету кинематических параметров резцовых исполнительных механизмов посвящены исследования А. С. Архангельского, В. Г. Унгефуга, Л. Б. Глатмана, Е. К. Губенкова, Г. И. Грановского, Н. П. Юдина, Б. Н. Толстых [1–7].

В статье В. Г. Унгефуга получены общие параметрические уравнения движения резца в пространственной системе координат и найдена скорость его движения [5]. Кинематические углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  вектора абсолютной скорости движения инструмента определяются как углы, образуемые вектором  $\bar{V}$  абсолютной скорости и его проекцией на плоскость вращения инструмента (угол  $\psi_1$ ) и на плоскость, нормальную к радиусу вращения инструмента (угол  $\psi_2$ ) (рисунок 1).

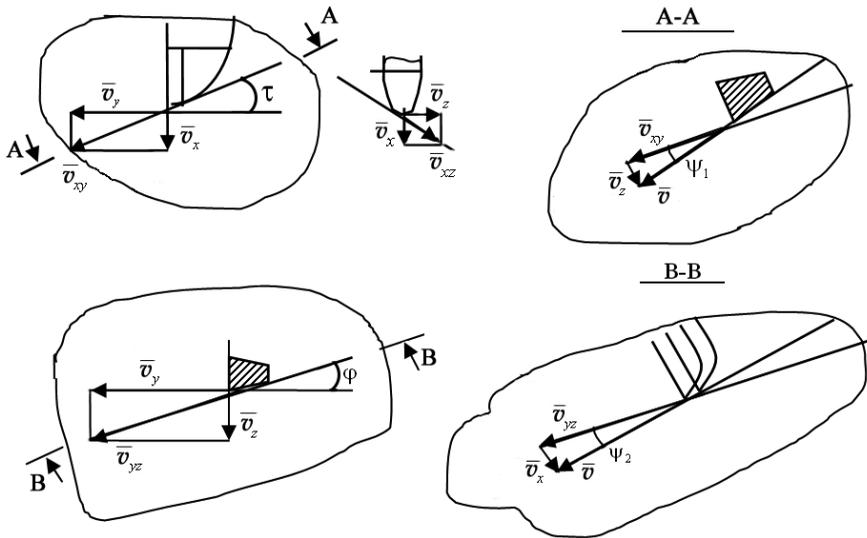


Рисунок 1 – Кинематические углы ( $\psi_2, \psi_1$ ) вектора абсолютной скорости движения резца для боковой и задней поверхности инструмента

В названной работе даны рекомендации по проектированию режущего инструмента, предложена конструкция резца, углы заточки которого обеспечивают рациональные условия резания с учетом  $\psi_1$  и  $\psi_2$ . Аналитические выражения для определения углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  имеют вид

$$\sin \psi_1 = -\sin \gamma (\lambda \cos \xi + \cos i \varphi) / \sqrt{\Pi},$$

$$\sin \psi_2 = \lambda (\sin i \varphi \cdot \cos \xi \cdot \cos \gamma + \cos i \varphi \cdot \sin \xi) / \sqrt{\Pi},$$

где  $\gamma, \xi$  – углы установки диска в пространстве, характеризующие положение плоскости относительно вращения резцов диска;  $\varphi = \omega_c t$  – угол поворота исполнительного механизма (водила);  $\lambda = R/r$  – отношение радиусов водила и диска;  $i = \omega_d / \omega_c$  – отношение угловых скоростей диска и водила;  $\Pi$  – планетарная функция основных параметров, определяемая в зависимости от основных параметров планетарного диска  $\gamma, \xi, \lambda, r, i, \varphi$  из выражения

$$P = \lambda^2 + 2[\cos i \varphi (1 + i \cos \gamma) \cos \xi - \sin i \varphi (i + \cos \gamma)] + (i + \cos \gamma)^2 + \cos^2 i \varphi \sin \gamma.$$

Она подробно исследована А. С. Архангельским в работе [3]. Частные случаи исследования данного уравнения приведены в работе [5]. Для общего случая оно не имеет аналитического решения.

В работе Е. К. Губенкова исследование основных закономерностей движения резового инструмента переносится в область планетарных исполнительных органов с иным расположением осей [4]. Автором выполнен расчет необходимых по условиям кинематики углов заточки инструмента. Для исключения внедрения задней и боковой граней в разрушаемый массив определяются угол движения  $\alpha_d$ , угол наклона  $\xi$  и угол поворота  $\Psi$  инструмента. Угол  $\alpha_d$  определяется как угол между плоскостями. Расчетные формулы с помощью аналитической геометрии получить достаточно сложно, так как требуется пространственное изображение расчетной схемы исполнительного органа. Поэтому при выводе уравнений автор не учитывал поступательное перемещение исполнительного органа, которое полагал пренебрежимо малым по сравнению с другими составляющими планетарного движения инструмента.

В работе Н. П. Юдина рассмотрены определение и исследование абсолютной скорости движения резцов и ее частных значений, в которых определена зависимость между скоростью вращения водила и углом установки резцов на рабочих дисках [6].

Для комбайна «Караганда 7/15», предназначенного для проведения подготовительных выработок и разработки угольных и калийных месторождений, Б. Н. Толстых предложил расчетные зависимости между скоростью вращения водила и углом установки резцов на рабочих дисках [7]. Автором предложена пространственная расчетная схема, в которой векторы скорости резания  $\vec{v}_p$  и относительного перемещения  $\vec{v}_n$  заданы направляющими косинусами и определен угол  $\theta$  между этими векторами. По углу  $\theta$  и абсолютным значениям скоростей  $\vec{v}_p$  и  $\vec{v}_n$  определяется угол  $\Psi$ , образуемый вектором  $\vec{v}_p$  и вектором  $\vec{v}$  абсолютной скорости движения резца. Предельные значения угла  $\rho$  установки резцов определяются в зависимости от угла  $\Psi$  и параметра  $\lambda$ .

Б. Н. Толстых упростил методику аналитического исследования кинематики резцов и конечные расчетные формулы. Исследования выполнены без учета подачи исполнительного механизма, а расчетные зависимости применимы только для рассматриваемого исполнительного органа [7]. Для исполнительных органов проходческих комбайнов типа «Карагандинец» угол установки резцов определялся в зависимости от угла, образуемого пересечением двух траекторий резания при движении дисков слева направо и наоборот.

Разработаны специальные устройства, обеспечивающие поворот резцов в процессе движения по направлению траектории, а именно, свободно поворачивающаяся державка для резца и устройства для принудительного поворота группы резцов с помощью одного гидродомкрата или каждого резца с помощью индивидуального малогабаритного гидродомкрата.

При кинематическом исследовании шнеко-планетарного исполнительного органа В. Б. Санкин определил угол между осью резца и вектором абсолютной скорости и вывел расчетные формулы для определения углов, при которых исключается внедрение задней и боковых граней в разрушаемый массив [8]. Однако полученные зависимости довольно громоздки, основаны на поочередном сложении скоростей, требуют пространственных изображений положения резца и построения косоугольного параллелепипеда. Кроме того, вряд ли целесообразно вычисление косинуса угла между вектором абсолютной скорости и осью резца. Найденные зависимости достаточно сложны и применимы только для шнеко-планетарного исполнительного органа.

Для упрощения расчета  $\alpha_d$  движение подачи можно разложить на продольное (вдоль оси исполнительного механизма) и поперечное. При поперечной подаче резец движется по траектории, представляющей собой удлиненную сферическую циклоиду, и происходит основное разрушение массива. С целью упрощения расчетов поперечное перемещение исполнительного механизма принимается соответствующим кинематической схеме резания при фрезеровании, когда главное вращательное и вспомогательное поступательное движения происходят в одной плоскости, совпадающей с плоскостью вращения. Все точки могут перемещаться при этом по удлиненной циклоиде или трохоиде. Тогда  $\alpha_d = \varphi - \beta$ , где  $\varphi$  – угол качения; угол  $\beta$  определяется по величине направляющего косинуса.

При продольной подаче вдоль оси исполнительного механизма каждая точка режущей кромки резца движется по винтовой линии с шагом, равным осевой подаче  $S'_0$  режущей головки за один оборот. В этом случае угол движения  $\alpha_d$  равен углу подъема винтовой линии и определяется из равенства

$$\alpha'_d = \arctg(S'_0 / \pi D),$$

где  $D$  – диаметр головки по резцам [9].

Разработанные на основе аналитической геометрии указанные выше расчетные зависимости и пространственные схемы громоздки и трудоемки для составления применительно к сложному движению разрушающего исполнительного механизма. Его поступательная подача не учитывается, так как математическое описание перемещающихся плоскостей и определение угла между ними значительно усложняют расчетную схему и кинематический расчет в целом. Кинематические углы в процессе резания не соответствуют геометрическим углам режущего инструмента. Для сравнения геометрии

резца с его кинематическими углами необходим дополнительный перерасчет полученных зависимостей. Их трактовка у каждого автора различна, отличаются также методы и методика их определения.

Для того чтобы геометрические углы резцов соответствовали кинематическим углам  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , необходимо знать углы  $\varphi$  и  $\tau$  (рисунок 1):  $\operatorname{tg} \psi_1 = \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \tau$ ,  $\operatorname{tg} \psi_2 = \operatorname{tg} \tau \cdot \cos \varphi$ . Подставляя в данные выражения соответствующие значения углов, получим

$$v_z/v_{xy}=(v_z/v_y)\cdot(v_y/v_{xy}), \quad v_x/v_{yz}=(v_x/v_y)\cdot(v_y/v_{yz}).$$

Следовательно, для обеспечения в процессе разрушения массива необходимых кинематических углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  боковые и задний углы резца в статике следует определять из выражений

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \psi_1 / \cos \tau = v_z / v_y, \quad \operatorname{tg} \tau = \operatorname{tg} \psi_2 / \cos \varphi = v_x / v_y.$$

Углы  $\varphi$  и  $\tau$  являются кинематическими углами резца в процессе резания. Чтобы оценить эффективность резцов, а, следовательно, и исполнительного механизма, достаточно знать отдельные составляющие вектора абсолютной скорости, которые устанавливают необходимые углы их заточки. Для определения угла  $\varphi$  необходимо знать  $v_z$  и  $v_y$ , а для определения угла  $\tau$  –  $v_x$  и  $v_y$ . Кинематический угол для передней грани находится по формуле  $\operatorname{tg} \xi / 2 = v_z / v_x$ . Ось  $X$  направлена вдоль оси резца, ось  $Y$  – перпендикулярно оси  $X$  в плоскости симметрии резца, ось  $Z$  – перпендикулярно плоскости симметрии резца.

Существующие методики и расчетные зависимости применимы только для одной конструкции исполнительного механизма, их нельзя использовать для совокупности органов. Исходные данные при расчетах различны и представлены в виде соотношений, не выделены основные конструктивные и кинематические параметры. Отсутствуют и расчетные формулы для общего случая движения исполнительных механизмов. При постановке задач следует использовать теорию кинематики точки и твердого тела [9]. Пространственные расчетные схемы должны быть компактны, достаточно просты и при сложном движении режущего инструмента.

Большая компактность записи достигается при решении задач матричным методом [10]. Разработка матричных уравнений расчета кинематических параметров пространственных исполнительных механизмов представляет определенный научный и практический интерес. Составными частями методологии их вывода должны являться разработка методик и матричных уравнений, сравнительная оценка различных методов и практические рекомендации по их использованию, расчет кинематических параметров на ЭВМ и рекомендации по оптимальной установке режущего инструмента. При решении проблемы необходим системный подход, каждый отдельный метод

по методике изложения и по исходным параметрам должен отвечать требованиям системы в целом.

Исходные конструктивные параметры должны быть едины для исполнительных механизмов любой конфигурации: выполненных в виде конуса, сферы, цилиндра, овального корпуса, диска. Для всех конструкций исходными расчетными конструктивными параметрами будут расстояние от оси поворота исполнительного механизма до плоскости вращения или до центра диска ( $R$ ) и текущий радиус ( $r$ ) вращения резца [9–14]. Угловые скорости вращения и перемещение режущей головки должны соответствовать сумме элементарных движений резца в процессе резания [9, 14]. Методика расчета кинематических параметров режущего инструмента исполнительных механизмов матричным методом в общем случае частично рассмотрена и проанализирована в работах [9–14]. При определении скорости и ускорения режущего инструмента пространственных исполнительных механизмов и центра схвата роботов-манипуляторов следует использовать матричный метод. Оценка целесообразности применения данного метода должна осуществляться на примере простейших схем исполнительных механизмов, как, например, в работе [15].

**Выводы.** Изложена теория расчета кинематических параметров оснащенных режущим инструментом пространственных исполнительных механизмов. Установлено, что кинематические углы резцов исполнительных механизмов в процессе резания не соответствуют геометрическим углам режущего инструмента. Для сравнения геометрии резца с его кинематическими углами необходим дополнительный расчет на основе проанализированных в работе зависимостей. Предложены аналитические зависимости для расчета кинематических углов резцов в процессе резания и исходные конструктивные и кинематические параметры исполнительных механизмов для их расчета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Грановский, Г. И. Кинематика резания / Г. И. Грановский. – М. : Машгиз, 1947. – 200 с.
- 2 Грановский, Г. И. Резание металлов: учеб. для студ. машиностроительных и приборостроительных спец. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высш. шк., 1985. – 304 с.
- 3 Ключников, И. И. Проходческие комбайны ПКГ-3 и ПКГ-4 / И. И. Ключников, А. С. Архангельский. – М. : Госгортехиздат, 1961. – 176 с.
- 4 Барон, Л. И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами / Л. И. Барон, Л. Б. Глатман, Е. К. Губенков. – М. : Наука, 1968. – 216 с.
- 5 Унгефуг, В. Г. К теории аналитического расчета кинематических и геометрических параметров отделения стружки от массива инструментом резцовых дисковых исполнительных органов горных машин / В. Г. Унгефуг // Вопросы механизации и автоматизации в горной промышленности: сб. науч. тр. КНИУИ. – Москва : Недра, 1962. – Вып. 11. – С. 35–81.

6 Юдин, Н. П. Изыскание рациональной конструкции и исследование режимов работы дисковых исполнительных органов (на примере проходческих комбайнов «Караганда»): дис. ... канд. техн. наук / Н. П. Юдин. – М., 1963. – 320 с.

7 Толстых, Б. Н. Исследование кинематики планетарных исполнительных органов проходческих комбайнов «Караганда» / Б. Н. Толстых // Вопросы механизации и автоматизации в горной промышленности: сб. науч. тр. КНИУИ. – М. : Недра, 1967. – Вып. 20. – С. 87–102.

8 Санкин, В. Б. Некоторые вопросы определения параметров шнеко-планетарного исполнительного органа очистного узкозахватного комбайна / В. Б. Санкин // Механизация горных пород на угольных шахтах: Сб. науч. тр. ТПИ. – Тула, 1973. – С. 55–64.

9 Локтионов, А. В. К методике аналитического расчета кинематических параметров исполнительного механизма/ А. В. Локтионов // Пути совершенствования технологических процессов в машиностроении. – Минск : Университетское, 1990. – С. 150–155.

10 Локтионов, А. В. К матричной записи кинематических параметров режущего инструмента горной машины / А. В. Локтионов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 7. – С. 138–141.

11 Локтионов, А. В. Методика расчета кинематических параметров корончатых исполнительных органов матричным методом / А. В. Локтионов // Механизация горных работ на угольных шахтах. – Тула: ТПИ, 1986. – С. 125–132.

12 Локтионов, А. В. Расчет кинематических параметров режущего инструмента исполнительных органов проходческих комбайнов / А. В. Локтионов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1989. – № 4. – С. 69–72.

13 Локтионов, А. В. Расчет кинематических параметров режущего инструмента исполнительных органов проходческих комбайнов с продольной режущей головкой / А. В. Локтионов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – № 1. – С. 74–76.

14 Локтионов, А. В. Расчет и эффективность исполнительных органов проходческих комбайнов / А. В. Локтионов, В. Б. Богданов, Б. И. Яцков. – Минск : Университетское, 1995. – 170 с.

15 Локтионов, А. В. Расчет кинематических параметров пространственных исполнительных механизмов / А. В. Локтионов // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 8. – С. 106–120.

*A. V. LOKTIONOV*

*Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus*

## **CALCULATION THEORY FOR THE KINEMATIC PARAMETERS OF THE SPATIAL ACTUATORS CUTTING TOOL**

The methods of kinematic parameters calculating for the spatial actuators cutting tool were analyzed. It was established that the kinematic angles of actuators cutters does not correspond to the geometric angles of the cutting tool during the cutting process. There were proposed the analytical dependencies for their calculation of the cutters' kinematic angles calculation for the cutting process and the original constructional and kinematic parameters of executive mechanisms.

Получено 09.09.2015