

УДК 621.952

## РЕАКЦИЯ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ НА НАПРАВЛЯЮЩИХ ОПОРАХ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПО СХЕМЕ ВТА(STS)

**Пермяков А.А.**, докт. техн. наук (НТУ "ХПИ", г. Харьков)

**Пациора А.П.**, канд. техн. наук

(ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск)

**Чикина Н.А.**, канд. техн. наук (НТУ "ХПИ", г. Харьков)

*The lubricating layer pressure distribution function for guiding pads of tools for the deep holes machining is received. The influence of such parameters as the rotating tool speed, the viscosity liquid coolant, the gap between guiding pads and the hole on the lubricating layer carrying capacity is analyzed. Equations for the lubricating layer reaction on guiding pads are presented*

**Введение.** Качество обработки глубоких отверстий с наружным подводом СОЖ в системе STS(ВТА) в значительной степени зависит от состояния направляющих опор инструмента. Уменьшение диаметра инструмента вследствие износа направляющих опор приводит к потере жесткости, что является одной из причин увода оси [1, 2] и снижения показателей шероховатости и точности отверстия. В работе [3] доказана возможность реализации гидродинамического эффекта между направляющими опорами и обрабатываемой поверхностью. Создание условий, при которых направляющие опоры и поверхность отверстия разделены несущим слоем СОЖ, обеспечат минимальный и постоянный по значению коэффициент трения в течение всего времени обработки. Это исключит дисбаланс инструмента, связанный с изменением направления вектора результирующей нагрузки при увеличении значения коэффициента трения в процессе износа направляющих опор. Реализация данного решения позволит устранить составляющую величины увода оси отверстия, вызванную дисбалансом инструмента в процессе износа направляющих опор, улучшить шероховатость отверстия и обеспечить стабильность диаметра по всей длине отверстия.

**Основная часть.** Определение реакции смазочного слоя на направляющих опорах и влияния конструктивных и технологических факторов на ее значение позволит назначать такие конструктивные параметры инструмента и технологические режимы его работы, которые обеспечат гидродинамический эффект на максимальной площади направляющих опор. На рис. 1 приведена схема взаимодействия инструмента с деталью. В работе [3] получена функция распределения давления в несущем слое СОЖ по координате  $\alpha$  в интегральном виде:

$$p = \int \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0)\cos\alpha)^2} d\alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - угол поворота подвижной системы координат;  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости СОЖ;  $U_d$  - окружная скорость детали;  $U_c$  - окружная скорость инструмента;  $h_0$  - толщина слоя СОЖ на участке максимального давления из частного случая уравнения Рейнольдса для исследования смазочного



где  $A, B, \gamma, \omega$  – величины, введенные для упрощения записи функции.

Запись функции распределения давления в безинтегральном виде позволяет проанализировать характер изменения давления по координате  $\alpha$ , а также выявить факторы, влияющие на формирование несущего слоя СОЖ. Анализ функции производился в пакете MathCAD. При построении кривых  $p(\alpha)$  и дальнейшего анализа функции распределения давления были приняты следующие условия: диаметр инструмента по направляющим опорам 100 мм; динамический коэффициент вязкости СОЖ марки Асфол  $\mu=0,135\text{г/см}\cdot\text{с}$ ; окружная скорость детали  $U_d=0,105\text{м/с}$ , что соответствует частоте вращения  $n=200\text{об/мин}$ ; окружная скорость инструмента  $U_c=1,05\text{м/с}$ , что соответствует частоте вращения  $n=200\text{об/мин}$ ; толщина слоя СОЖ на участке максимального и минимального давления  $h_0=0,05\text{мм}$ , зазор между направляющими опорами и деталью в ненагруженном состоянии (вылет режущей пластины)  $\Delta=0,1\text{мм}$ . Диапазоны координат, в которых производился анализ функции, соответствуют стандартному размеру и расположению направляющих опор в конструкции головок глубокого сверления таких производителей как Botek и Sandvik Coromant.

На рис. 2,а показан график  $p(\alpha)$  изменения давления по координате  $\alpha$  в диапазоне  $\alpha \in [2,10; 2,44]$ , что соответствует расположению боковой направляющей опоры 5(II), рис. 1,а. На рис. 2,б показан график  $p(\alpha)$  изменения давления по координате  $\alpha$  в диапазоне  $\alpha \in [3,84; 4,19]$ , что соответствует расположению нижней направляющей опоры 5(I) на рис. 1,а.

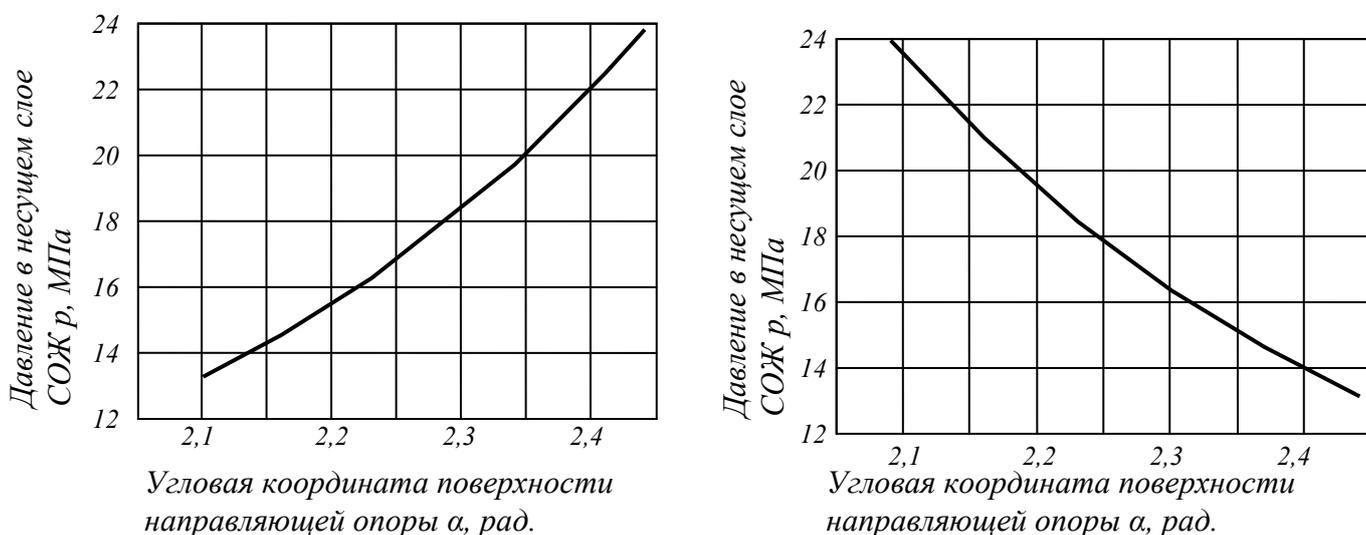


Рис. 2. Графики распределения давления  $p(\alpha)$  в несущем слое СОЖ под направляющими опорами инструмента: а – для боковой направляющей опоры, б – для нижней направляющей опоры

Функция (2) включает целый ряд переменных, отражающих влияние конструктивных особенностей инструмента и технологических режимов его работы на давление несущего слоя СОЖ. Выделим и проанализируем наиболее значимые: зазор между направляющими опорами и деталью в ненагруженном состоянии (вылет режущей пластины)  $\Delta$ , мм, длина дуги поверхности направля-

ющей опоры, заданная координатами  $\alpha$ , рад, скорость вращения инструмента  $U_c$ , м/с, динамический коэффициент вязкости СОЖ  $\mu$ , г/см·с.

На рис. 3 функция распределения давления представлена в виде поверхности как функция двух переменных  $p(\alpha, \Delta)$  для боковой направляющей опоры 5(II) и нижней 5(I) соответственно (рис. 1,а. Как видно из полученных графиков, с увеличением вылета режущей пластины давление в произвольной точке под направляющей опорой убывает, следствием чего является снижение реакции несущего слоя и появление участков непосредственного контакта направляющих опор с поверхностью отверстия. Это приводит к появлению износа направляющих опор, в процессе которого значение вылета режущей пластины  $\Delta$  возрастает, что, как показывают графики (рис. 3), приводит к дальнейшему снижению реакции несущего слоя СОЖ. Таким образом графические зависимости  $p(\alpha, \Delta)$  объясняют механизм поэтапного роста пятна износа и разрушения направляющей опоры, описанный нами и экспериментально подтвержденный в предыдущих работах.

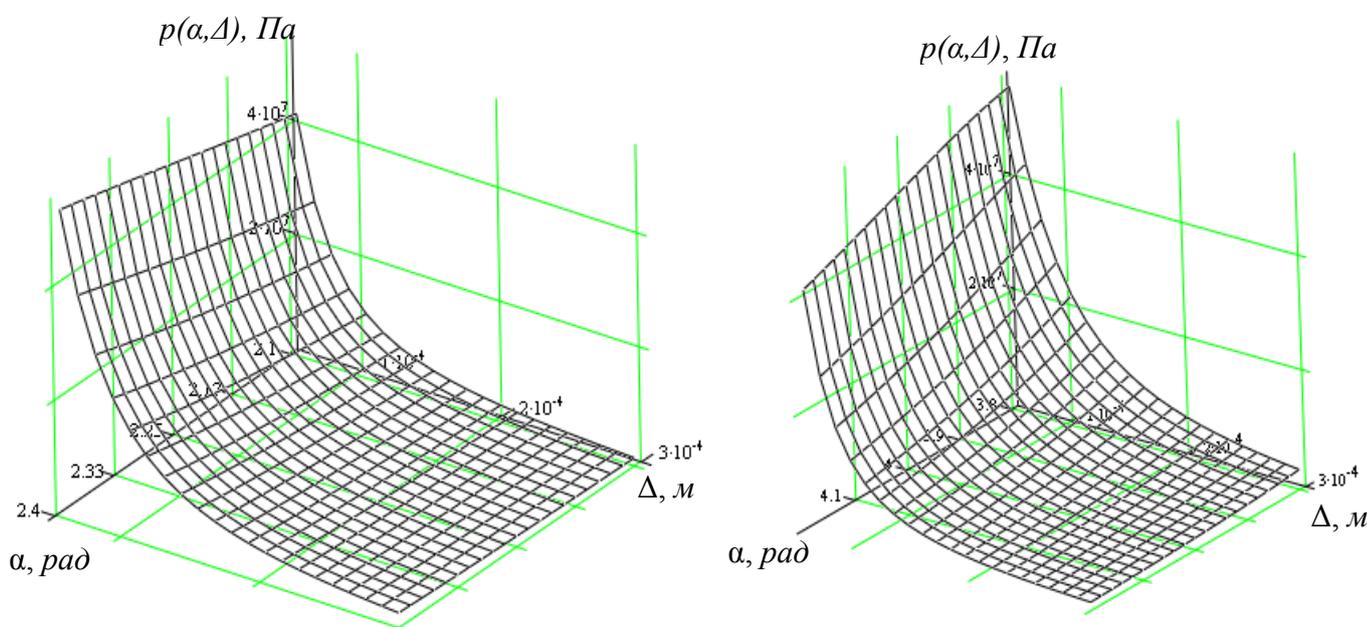


Рис. 3. Функция распределения давления по координате  $\alpha$  при различных значениях вылета  $\Delta$  периферийной режущей пластины: а – для боковой направляющей опоры, б – для нижней направляющей опоры

Исходя из графических представлений функции распределения давления (рис. 3), минимальная величина  $\Delta$  вылета периферийной режущей пластины обеспечивает наибольшее давление, а, следовательно, и несущую способность слоя СОЖ. Ограничением минимального значения величины  $\Delta$  является условие  $\Delta > h_0$ . Если рассматривать  $h_0$ , как минимально допустимую толщину смазочного слоя, то по аналогии с [4] можно записать:

$$h_0 = Ra_1 + Ra_2 + \lambda_1 + \lambda_2 + f_{max} + \zeta, \quad (3)$$

где  $Ra_1, Ra_2$  – высота микронеровностей на поверхности соответственно отверстия детали и направляющих опор;  $\lambda_1, \lambda_2$  – максимальное отклонение от прямо-

линейности образующих поверхностей соответственно отверстия детали и направляющих опор;  $f_{max}$  – максимальный размер частиц, загрязняющих СОЖ;  $\zeta$  – необходимая минимальная толщина слоя СОЖ, обеспечивающая возможность прохождения через зазор полезных составляющих масел.

Рассмотрим оставляющие формулы (3). Высота микронеровностей поверхности отверстия формируется режущей пластиной и частично сминается заходной частью направляющей опоры. Как известно, минимизации этого параметра можно достичь, выбрав геометрию режущей части с зачистной кромкой и выбрав режим работы с высокими скоростями и малыми оборотными подачами. При построении модели (рис. 3) нами была принята средняя шероховатость, достигаемая после операции глубокого сверления на ЗАО «НКМЗ»  $Ra_1=3,2$  мкм.

Малое значение  $Ra_2$  достигается на этапе проектирования и изготовления направляющих опор инструмента. Как показывает опыт эксплуатации направляющих опор, наибольшая их стойкость достигается при минимальной шероховатости их поверхности. При построении модели (рис. 3) нами была принята шероховатость направляющих опор фирмы Votek  $Ra_2=0,1$  мкм

Величинами  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в дальнейшем пренебрежем в виду относительно малой длины направляющих опор и высокой точности их изготовления.

Максимальный размер частиц загрязняющих СОЖ определяется технологией фильтрации и типом фильтровальной установки на конкретном станке. В наших условиях применялись магнитный и тканевый фильтры с фильтрующей способностью до 5 мкм, поэтому в теоретических и экспериментальных исследованиях мы исходим из  $f_{max}=0,005$  мм.

Необходимая минимальная толщина слоя СОЖ, обеспечивающая возможность прохождения через зазор полезных составляющих масел согласно [4]  $\zeta=0,002$  мм. Таким образом, минимальное принятое значение

$$h_0=0,0032+0,0001+0,005+0,002=0,0103 \text{ мм.}$$

Минимизация составляющих формулы (3) позволит работать с меньшими значениями  $h_0$  и  $\Delta$ , а, следовательно, обеспечить большее давление в несущем слое СОЖ. В дальнейшем нами планируется экспериментально подтвердить влияние этих параметров на стойкость направляющих опор и качество обработки, а также выработать рекомендации по назначению оптимальной режимной части и конструктивных параметров инструмента.

Рассмотрим влияние вязкости СОЖ на несущую способность масляного слоя. На рис. 4 функция распределения давления представлена в виде поверхности как функция двух переменных  $p(\alpha, \mu)$  для боковой направляющей опоры 5(II) и нижней 5(I) соответственно (рис. 1, а). Влияние вязкости исследовалось в диапазоне 0,01 – 0,05 кг/(м·с), что соответствует 0,1 – 0,5 Пуаза – диапазон вязкостей большинства отечественных и зарубежных масляных СОЖ.

С увеличением вязкости давление в несущем слое СОЖ, а следовательно, и несущая способность возрастают. Однако чрезмерно высокая вязкость, согласно системе уравнений Рейнольдса для смазочного слоя [4], снижает скорость течения СОЖ. Это затрудняет проникновение СОЖ в зазор между

направляющими опорами и деталью, а также свободную циркуляцию в системе подвода и отвода СОЖ, что нарушает один из главных принципов глубокого сверления – беспрепятственный и быстрый отвод стружки.

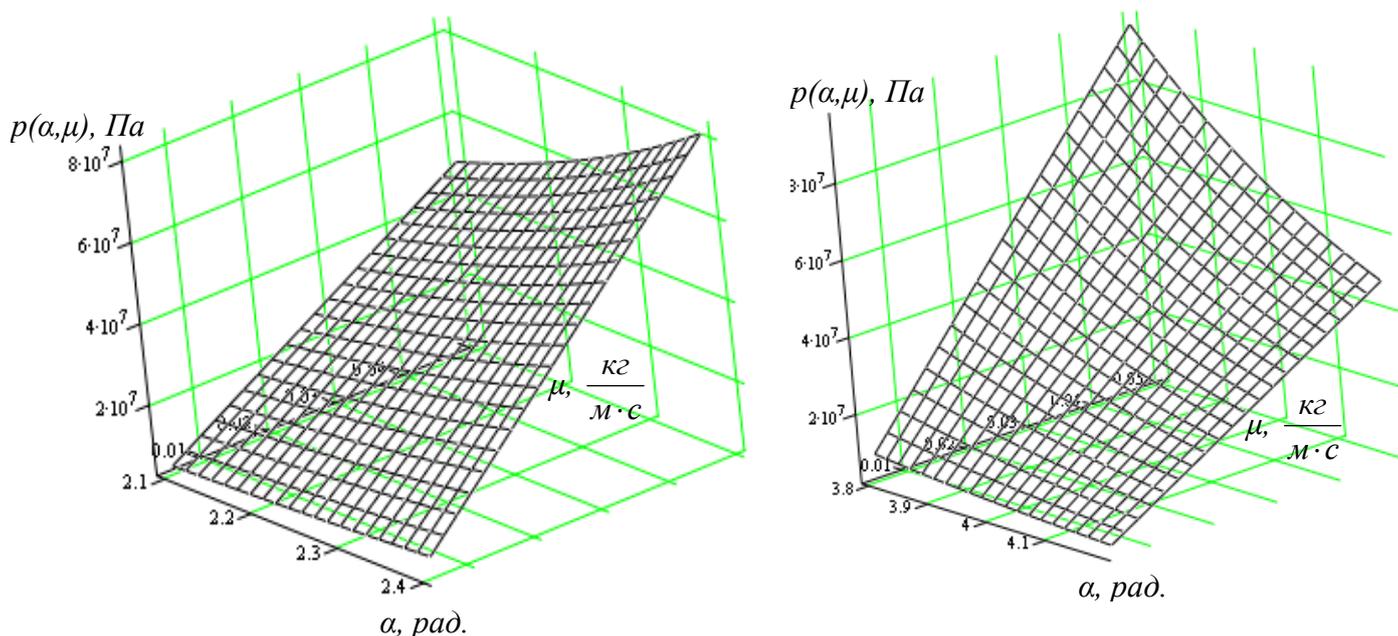


Рис. 4. Функция распределения давления по координате  $\alpha$  при различных значениях коэффициента динамической вязкости  $\mu$ :

$a$  – для боковой направляющей опоры;  $b$  – для нижней направляющей опоры

Рассматривая функцию (2) необходимо выделить наиболее важный технологический параметр, влияющий на формирование несущего слоя – скорость вращения инструмента  $U_c$ . На рис. 5 функция распределения давления представлена в виде поверхности как функция двух переменных  $p(\alpha, U_c)$  для боковой направляющей опоры 5(II) и нижней 5(I) соответственно, рисунок 1( $a$ ). Анализ влияния скорости вращения инструмента  $U_c$  проводился в диапазоне 0,5 – 3 м/с, что соответствует диапазону скоростей резания в зоне периферийной режущей пластины 30-180 м/мин.

Как видно, форма поверхности  $p(\alpha, U_c)$  сходна с вышерассмотренной зависимостью (рис. 4). Увеличение скорости вращения инструмента обеспечивает рост давления в несущем слое под любой точкой направляющей опоры. Ограничениями максимальных значений  $U_c$  являются стойкость режущей части инструмента, а также возможности оборудования. В настоящее время производители инструмента для глубокого сверления используют в качестве материала режущей части различные твердые сплавы на основе карбида вольфрама (WC). Рекомендуемые скорости резания, исходя из требований по обеспечению стойкости на всей длине обрабатываемого отверстия 60–120 м/мин. Как показали наши исследования, такие скорости резания не всегда обеспечивают требуемую реакцию в смазочном слое, что наряду с низкой шероховатостью поверхности является основной причиной появления и роста износа направляющих опор. В связи с этим одним из направлений в обеспечении гидродинамического эффек-

та является повышение скорости резания с применением сверхтвердых материалов. Кроме того, увеличение скоростей позволит снизить силы резания и результирующую их нагрузку на направляющие опоры.

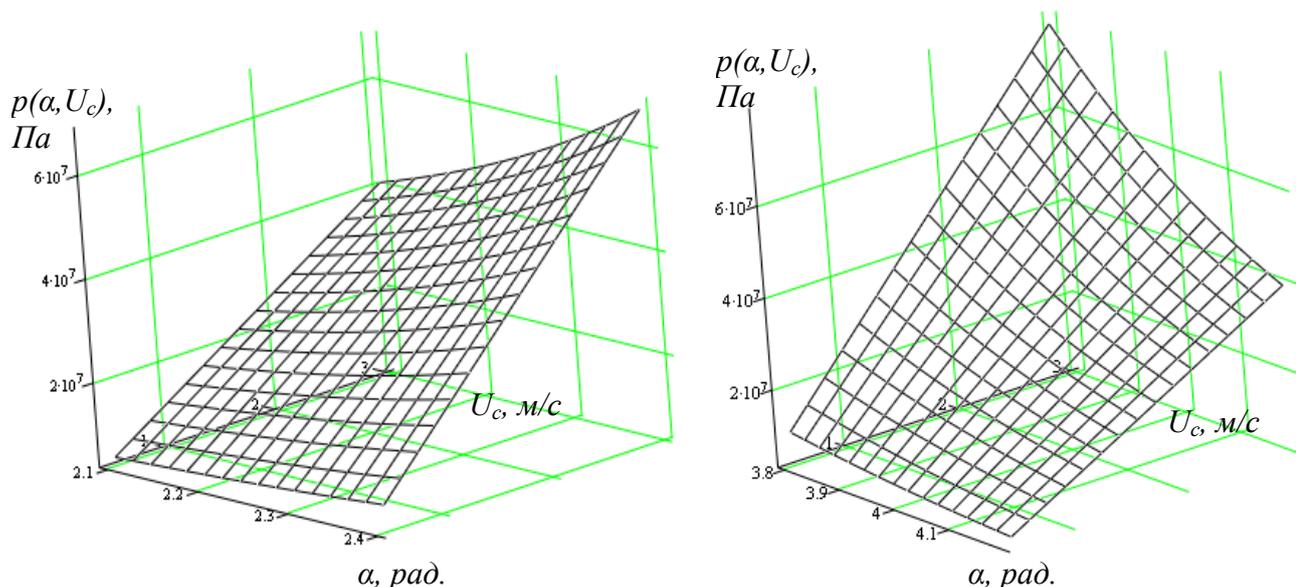


Рис. 5. Функция распределения давления по координате  $\alpha$  при различных скоростях вращения инструмента  $U_c$ : а – для боковой направляющей опоры; б – для нижней направляющей опоры

Составляющие  $P_{VII}$  и  $P_{UII}$  уравновешивающей нагрузки  $P$  реакции смазочного слоя для направляющей опоры  $II$  определяется интегрированием давления  $p$ , распределенного по площади рабочей поверхности направляющих опор, ограниченных углами  $\alpha_1 - \alpha_2$  [3]:

$$P_{VII} = r \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^L p \cdot \cos \alpha d\alpha dy; \quad P_{UII} = r \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^L p \cdot \sin \alpha d\alpha dy; \quad (4)$$

где  $L$  – длина рабочей части направляющих опор,  $r$  – радиус рабочей поверхности направляющих опор,  $p$  – функция распределения давления в смазочном слое по координате  $\alpha$ ,  $y$  – координата точки направляющей опоры вдоль оси инструмента

Аналогично, определяются составляющие  $P_{VI}$  и  $P_{UI}$  реакции смазочного слоя для направляющей опоры  $I$  в пределах интегрирования  $\alpha_3 - \alpha_4$ .

Поочередно подставив функцию распределения давления в безинтегральном виде (2) в (4) после ряда математических преобразований и введения восьми новых переменных для упрощения записи результата  $A_v, B_v, C_v, D_v, A_w, B_w, C_w, D_w$  нами были получены уравнения составляющих реакции смазочного слоя на направляющих опорах инструмента в безинтегральном виде (5) и (6). Составляющая реакции смазочного слоя  $P_v$  на боковой направляющей опоре:

$$P_{VII} = r \cdot L \cdot \gamma \cdot \left( A_v - B_v - \frac{C_v - D_v}{2 \cdot B} \right), \quad (5)$$

$$A_{VII} = \sin(\alpha) \cdot \arctg(\omega \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2})) \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2},$$

$$B_{VII} = \frac{\omega}{\omega^2 - 1} \ln \left| \frac{1 + \operatorname{tg}^2(\frac{\alpha}{2})}{\omega^2 + \operatorname{tg}^2(\frac{\alpha}{2})} \right| \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2},$$

$$C_{VII} = \sin(\alpha) \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2})) \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2},$$

$$D_{VII} = 2 \cdot \omega \cdot \int_{\operatorname{tg}(\frac{\alpha_1}{2})}^{\operatorname{tg}(\frac{\alpha_2}{2})} \frac{2 \cdot t}{t^2 + 1} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) \cdot dt,$$

где  $t$  – промежуточная переменная интегрирования,  $t = \operatorname{tg} \alpha / 2$ .

Составляющая реакции смазочного слоя  $P_U$  на боковой направляющей опоре II:

$$P_{UII} = r \cdot L \cdot \gamma \cdot (A_U + B_U - \frac{C_U + D_U}{2 \cdot B}), \quad (6)$$

$$A_{UII} = -\cos(\alpha) \cdot \arctg(\omega \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2})) \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2},$$

$$B_{UII} = \left( \frac{\omega \cdot \alpha}{1 - \omega^2} - \frac{1 + \omega^2}{1 - \omega^2} \cdot \arctg(\omega \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2})) \right) \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2},$$

$$C_{UII} = -\cos(\alpha) \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2})) \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2},$$

$$D_{UII} = 2 \cdot \omega \cdot \int_{\operatorname{tg}(\frac{\alpha_1}{2})}^{\operatorname{tg}(\frac{\alpha_2}{2})} \frac{1 - t^2}{1 + t^2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) \cdot dt;$$

где  $t$  – промежуточная переменная интегрирования,  $t = \operatorname{tg} \alpha / 2$ .

Аналогично, в пределах интегрирования  $\alpha_3 - \alpha_4$  могут быть получены составляющие реакции смазочного слоя  $P_{VI}$  и  $P_{UI}$  на нижней направляющей опоре.

**Выводы.** Полученная функция распределения давления в безинтегральном виде (2) позволила провести исследование влияния конструктивных параметров инструмента и технологических факторов на формирование несущего слоя СОЖ а также вывести уравнения реакции смазочного слоя, которые в сочетании с зависимостями, полученными нами в [5], позволяют описать движение инструмента при работе в гидродинамическом режиме смазки направляю-

щих опор. На основании полученных результатов возможен точный расчет параметров инструмента и назначение режимов резания, обеспечивающих безизносный режим работы направляющих опор и максимальное качество обработки глубоких отверстий.

**Список литературы:** 1. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление / Н.Д. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1971. – 276 с. 2. Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.И. Кижняев, Б.А. Немцев, А.А. и др. – Л.: Машиностроение, 1988. – 269 с. 3. Пермяков А.А. Теоретические основы формирования гидродинамического эффекта на направляющих опорах инструмента для обработки глубоких отверстий / А.А. Пермяков, А.П. Пациора // Вестник национального технического университета ХПИ»: сб. научных трудов. – Харьков, 2010. – Вып. 41. – С. 101–110. 4. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле / А. Камерон. – М.: ГНТИМашЛит, 1962. – 296 с. 5. Пермяков А.А. Математическая модель силового взаимодействия инструмента и заготовки при обработке глубоких отверстий в условиях определенности базирования / А.А. Пермяков, А.П. Пациора // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. научн. тр. – Краматорск, 2009. – Вып. 24. – С. 272–276.

УДК 658.519

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОНОВОК МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Шелковой А.Н.,** докт. техн. наук, **Семченко М.С.**  
(Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)

*In the article the ground of increase of efficiency of planning of arrangement of equipment of area of tooling cutting is given on the basis of imitation design with the use of logic-linguistics approach and theory of mass service*

**Введение.** Проблема эффективности проектирования металлорежущих станков становится актуальной на фоне растущих требований к производительности производственных систем при одновременном уменьшении серийности производства. Современный уровень технических средств позволяет создавать производственные системы с высокой степенью автоматизации и достаточной гибкостью для возможности охвата широкой номенклатуры обрабатываемых деталей. Проектирование таких систем является весьма трудоемкой задачей. В данной статье исследуется проблема оценки эффективности применения имитационного моделирования при проектировании станочных систем.

**1. Математическая модель функциональных модулей системы моделирования.** Для разработки математической модели системы имитационного моделирования рассмотрим типовую структуру станочных систем на примере гибкой производственной системы (ГПС). На рис. 1 представлена структура ГПС, в состав которой входит три металлорежущих станка, два промышленных робота и два автоматизированных склада, а на рис. 2 – граф, представляющий эту систему. В типовой схеме ГПС присутствуют три вида связей: