



Огневенко Евгений Сергеевич

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ПУТЕМ  
ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА  
ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

Специальности: 05.02.08 – Технология машиностроения,  
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической  
обработки

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент  
Кряжев Юрий Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Рахимянов Харис Магсуманович

кандидат технических наук, доцент  
Роговой Валерий Михайлович

Ведущая организация:

ОАО ХК «Барнаултрансмаш»

Защита состоится «23» декабря 2010 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н., доцент



Ю. О. Шевцов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы.**

Обработка отверстий спиральными сверлами является одной из наиболее распространенных операций механической обработки, порядка 30% от общего объема продукции инструментального производства занимают спиральные сверла. В тоже время, в силу конструктивных особенностей спирального сверла (недостаточная жесткость, неблагоприятная геометрия режущей части у оси и т.д.) операция сверления является малопродуктивной.

Операция сверления зачастую лимитирует производительность в технологическом процессе механической обработки. В результате для обеспечения заданной производительности технолог вынужден назначать более интенсивные режимы резания, что в свою очередь, может существенно увеличить себестоимость обработки. Кроме того, при сверлении отверстий возникают различные динамические процессы, в том числе колебания спирального сверла, обусловленные относительно низкой жесткостью инструмента. В случае, когда амплитуда продольных колебаний превышает толщину срезаемого слоя, происходит периодический отрыв задней поверхности спирального сверла от поверхности резания. При этом процесс сверления сопровождается ударами и выкрашиванием режущих лезвий, интенсивным истиранием поверхностей направляющих ленточек, что существенно снижает стойкость инструмента. Переменный характер процесса резания, обусловленный колебаниями спирального сверла, может привести к преждевременному отказу и увеличению вариации стойкости режущих инструментов. В результате производительность операции сверления будет снижена вследствие увеличения доли времени на смену инструмента. В связи с этим при выборе режимов резания необходимо учитывать влияние колебаний на стойкость спирального сверла. Однако, отсутствие экспресс-методики, позволяющей определить параметры колебаний при сверлении, и включающей расчет интенсивности износа режущего элемента, лимитирующего стойкость спирального сверла с учетом параметров колебаний инструмента, выбор оптимальных режимов резания и автоматизированный расчет выходных технологических параметров операции, приводит к снижению производительности и возрастанию затрат на механическую обработку, увеличивает трудоемкость технологической подготовки производства (ТПП).

Таким образом, исследования, направленные на разработку экспресс-методики для выбора оптимальных режимов резания, обеспечивающей повышение производительности и снижение себестоимости обработки отверстий спиральными сверлами являются актуальными.

### **Цель работы.**

Повышение производительности и снижение себестоимости обработки отверстий спиральными сверлами путем выбора оптимальных режимов резания на основе анализа динамики процесса сверления с применением автоматизированного информационно-измерительного комплекса.

### **Методы и средства исследования.**

Теоретические и экспериментальные исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теории о резании металлов, математического моделирования. Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с помощью методов математической статистики.

### **Научная новизна.**

1. Установлены зависимости между режимами резания, параметрами колебаний и интенсивностью износа спирального сверла, позволяющие прогнозировать стойкость инструмента, себестоимость и трудоемкость операции сверления.

2. Разработаны методические основы выбора режимов резания с учетом параметров колебаний спирального сверла при обработке, включающие систему ограничений, учитывающих себестоимость и трудоемкость операции сверления.

3. Разработана экспресс-методика определения оптимальных режимов резания методом акустической эмиссии (АЭ), позволяющая снизить трудоемкость проектирования операции сверления.

### **Практическая ценность.**

1. Разработан автоматизированный информационно-измерительный комплекс для выбора оптимальных режимов резания, включающий:

- приспособления к металлорежущим станкам, позволяющие определить параметры колебаний спирального сверла при обработке (патенты RU №84976, RU №2354506);

- экспериментальную установку для экспресс-определения режимов резания при сверлении методом АЭ, включающую специальное программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008611352), способ определения длины участка касания ленточками концевой инструмента поверхности обрабатываемого отверстия (патент RU №2395372) и устройство для управления процессом обработки отверстий (патент RU №2362655);

- установку для физического моделирования процесса износа;

- программное обеспечение для автоматизации этапов проектирования операции сверления.

2. Разработана математическая модель процесса сверления и программное обеспечение, включающее информационное сопровождение в виде баз данных (БД) «Коэффициенты математических моделей процесса сверления» и «Величины допустимого износа спиральных сверл» (свидетельства о государственной регистрации баз данных №2010620114, №2010620394), позволяющие автоматизировать этапы проектирования операции сверления.

### **Апробация работы.**

Результаты диссертационного исследования докладывались на всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (г. Барнаул 2007, 2008, 2009), городской научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь – Барнаулу» (г. Барнаул 2007). Результаты работы обсуждались на научных семинарах кафедр «Общая технология машиностроения» и «Технология автоматизированных производств» ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» в 2007 – 2010 гг.

### **Публикации.**

Автором опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации работ соискателей научных степеней, получено 3 патента на изобретение, патент на полезную модель, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 свидетельства о государственной регистрации БД.

## **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 150 страницах текста, содержит 47 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 121 источника.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность выполненной работы, приводится ее общая характеристика, сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** раскрыто современное состояние проблемы повышения производительности и снижении себестоимости обработки отверстий спиральными сверлами. Анализ технической литературы по данной проблеме показал, что потеря работоспособности спиральных сверл связана с интенсивным износом одного из режущих элементов, лимитирующих стойкость спирального сверла: направляющих ленточек, уголков, задних поверхностей, перемычки. Особое влияние на интенсивность износа режущего элемента, лимитирующего стойкость спирального сверла оказывают колебания, возникающие при механической обработке. При этом амплитуда колебаний спирального сверла в 2...3 раза превышает амплитуду колебаний инструмента при точении и фрезеровании. Анализ работ Б.П. Бармина, Д.Т. Васильева, Б.Д. Даниленко, В.И. Денисенко, И.Г. Жаркова, Ю.А. Кряжева, В.А. Кудинова, С.Г. Лакирева, В.Н. Подураева, Д.И. Рыжкова, Н.Д. Троицкого, Ю.П. Холмогорцева и др., посвященных исследованиям динамики процесса резания и особенностям работы спиральных сверл, показал, что колебания спирального сверла способствуют снижению стойкости инструмента.

Анализ методик и рекомендаций по выбору режимов резания при сверлении показал, что авторы не учитывают влияние колебаний на интенсивность износа режущего элемента, лимитирующего стойкость спирального сверла. Например, назначение режимов резания на основании данных стойкостных испытаний партии сверл меньшей длины приводят к тому, что сверла относительно большей длины, имеющих значительно меньшую жесткость, интенсивно изнашиваются в условиях большей амплитуды колебаний. При прочих равных условиях увеличение амплитуды продольных колебаний спирального сверла с 0,15 до 0,28 мм приводит к уменьшению периода стойкости в два раза. В этих условиях увеличиваются затраты времени на смену инструмента, что снижает производительность обработки, а в условиях автоматизированного производства при обработке нескольких отверстий с помощью многошпиндельной головки существенно увеличивает себестоимость механической обработки. Анализ потерь производительности в условиях автоматизированного производства показал, что потери по инструменту составляют до 16%. В то же время, в современной технической литературе явно недостаточно сведений о влиянии частоты и амплитуды колебаний на интенсивность износа режущих элементов, лимитирующих стойкость спирального сверла.

Таким образом, для повышения производительности и снижения себестоимости механической обработки отверстий необходимо разработать автоматизированный информационно-измерительный комплекс для выбора оптимальных режимов резания, позволяющий определить параметры колебаний при сверлении, и включающий расчет интенсивности износа режущего элемента, лимитирующего стойкость спирального сверла с учетом параметров колебаний инструмента.

Исходя из цели диссертационного исследования и данных литературного обзора, были сформулированы следующие основные задачи:

1. Разработать расчетную схему и математическую модель процесса сверления, позволяющую на этапе ТПП прогнозировать параметры колебаний, стойкость инструмента, трудоемкость и себестоимость операции сверления.

2. Установить зависимости частоты и амплитуды колебаний спирального сверла от режимов резания, обосновать влияние колебаний на интенсивность износа режущих элементов, лимитирующих стойкость инструмента.

3. Разработать экспресс-методику выбора оптимальных режимов резания при обработке отверстий спиральными сверлами, включающую определение параметров колебаний инструмента методом АЭ.

4. Разработать автоматизированный информационно-измерительный комплекс для определения оптимальных режимов резания при сверлении, обеспечивающий повышение производительности и снижение себестоимости обработки отверстий.

5. Провести апробацию результатов исследований в условиях производства.

Во **второй главе** рассматривается математическая модель процесса сверления, построенная с учетом режимов резания и геометрических параметров спирального сверла.

Расчетная схема процесса сверления представлена в виде одномассовой модели, согласно рекомендациям И.Г. Жаркова. Спиральное сверло представлено в качестве доминирующей колебательной системы, т.к. обладает значительно меньшей жесткостью по сравнению с другими элементами (станком, оснасткой, заготовкой) технологической системы и совершает в процессе обработки наибольшие по амплитуде колебания.

Математическая модель для одномассовой расчетной схемы представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} I\ddot{\varphi}(t) + \eta\dot{\varphi}(t) + j\varphi(t) - j_{x\varphi}x(t) = M_{KP}(n, S, d) + K_{\varphi}(x(t - \tau) + x(t - T/2 - \tau)) \\ m\ddot{x}(t) + h\dot{x}(t) + cx(t) - c_{\varphi x}\varphi(t) = P_O(n, S, d) + K_x(x(t - \tau) + x(t - T/2 - \tau)) \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$ ,  $I$  – соответственно приведенная масса (кг) и приведенный момент инерции (кг·м<sup>2</sup>) колебательной системы;  $h$ ,  $\eta$  – обобщенные коэффициенты демпфирования в продольном (Н·с/м) и крутильном (Н·м·с/рад) направлении;  $c$ ,  $j$  – коэффициенты суммарной жесткости в продольном (Н/м) и крутильном (Н·м/рад) направлении;  $c_{\varphi x}$ ,  $j_{x\varphi}$  – коэффициенты координатной связи в продольном (Н/рад) и крутильном (Н·м/м) направлении, учитывающие взаимное влияние осевой силы и крутящего момента;  $x$ ,  $\varphi$  – осевое смещение (м), вызванное приложением осевой силы и крутильное смещение (рад), вызванное приложением крутящего момента;  $P_O$  – осевая сила (Н);  $M_{KP}$  – крутящий момент (Н·м);  $t$  – время (с);  $\tau$  – фазовая характеристика силы резания (с), т. е. отставание изменения силы резания от изменения толщины срезаемого слоя;  $T$  – время одного оборота сверла (с), учитывает резание «по следу» второй режущей кромки;  $K_x$ ,  $K_{\varphi}$  – коэффициенты резания в продольном (Н/м) и крутильном (Н·м/м) направлении.

Коэффициенты жесткости в продольном  $c$ , и крутильном  $j$  направлениях, а также коэффициенты координатной связи  $c_{\varphi x}$ ,  $j_{x\varphi}$  определялись при помощи компьютерного моделирования геометрической формы спирального сверла и последующего анализа трехмерной твердотельной модели в программе для инженерных расчетов COSMOS-Works методом конечных элементов. Собственные частоты, логарифмические декременты колебаний, а также приведенные масса и момент инерции определялись экспериментально по графикам свободных затухающих колебаний инструмента. Для автоматизации расчета параметров колебаний сверл диаметром 5...20 мм, с длиной рабочей части  $l=52...140$  мм, изготовленных по ГОСТ 10902-77 и ГОСТ 10903-77, была разра-

ботана БД «Коэффициенты математических моделей процесса сверления» (свидетельство о государственной регистрации БД №2010620114).

Анализ существующих выражений для расчета крутящего момента и осевой силы при сверлении показал, что они не учитывают влияние скорости резания, не обеспечивают необходимой точности, а эмпирические зависимости адекватны в узком диапазоне режимов резания. Поэтому уравнения для расчета крутящего момента и осевой силы были получены путем аппроксимации экспериментальных данных (при сверлении чугуна СЧ-20 ГОСТ 1412-85) методом наименьших квадратов. Среднее квадратичное отклонение составило не более 5%. В результате для расчета крутящего момента было получено уравнение вида:

$$M_{KP} = a_1 \cdot n \cdot S^{\alpha_1} \cdot (e^{-\beta_1 \cdot n} + \frac{e}{0,01 + b_1 \cdot n}) \cdot d^{\gamma_1}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2)$$

для расчета осевой силы – уравнение вида:

$$P_o = a_2 \cdot n^{\alpha_2} \cdot S^{\beta_2} \cdot d^{\gamma_2}, \text{ Н} \quad (3)$$

где  $n$  – частота вращения, об/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $d$  – диаметр сверла, мм;  $a_1, b_1, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  – коэффициенты и показатели степени для расчета крутящего момента (таблица 1);  $a_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  – коэффициенты и показатели степени для расчета осевой силы (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициенты и показатели степени для расчета крутящего момента и осевой силы

| Подача, мм/об | Для расчета крутящего момента                                        | Для расчета осевой силы                                |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 0,03...0,1    | $a_1=0,0037; b_1=0,082; \alpha_1=0,65; \beta_1=0,012; \gamma_1=1,97$ | $a_2=750; \alpha_2=0,175; \beta_2=0,8; \gamma_2=0,9$   |
| 0,1...0,21    | $a_1=0,0038; b_1=0,082; \alpha_1=0,7; \beta_1=0,0125; \gamma_1=1,99$ | $a_2=758; \alpha_2=0,173; \beta_2=0,85; \gamma_2=0,91$ |
| 0,21...0,36   | $a_1=0,0039; b_1=0,09; \alpha_1=0,71; \beta_1=0,012; \gamma_1=2,04$  | $a_2=769; \alpha_2=0,169; \beta_2=0,86; \gamma_2=0,92$ |
| 0,36...0,47   | $a_1=0,0042; b_1=0,095; \alpha_1=0,8; \beta_1=0,014; \gamma_1=2,1$   | $a_2=774; \alpha_2=0,167; \beta_2=0,87; \gamma_2=0,94$ |

Анализ математической модели (1) позволил сделать вывод о том, что спиральное сверло совершает колебания во всем диапазоне исследуемых режимов резания: подача  $S=0,1 \dots 0,47$  мм/об, скорость резания  $V=0,102 \dots 0,392$  м/с ( $n=195 \dots 750$  об/мин). Появление колебаний при сверлении обусловлено падающей характеристикой крутящего момента от частоты вращения (рисунок 1), а также отставанием изменения силы резания от изменения толщины срезаемого слоя (фазовая характеристика силы резания).

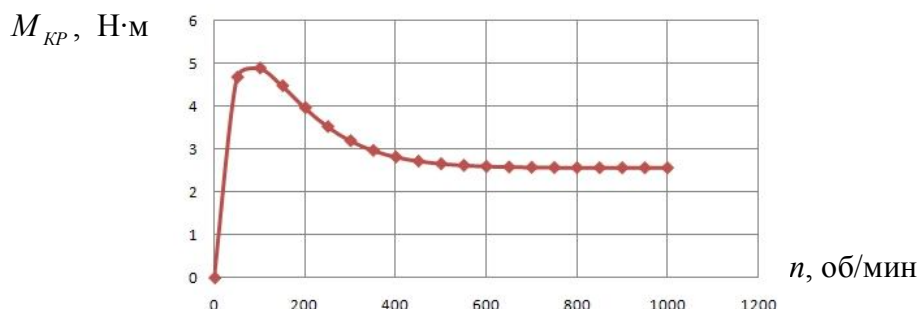


Рисунок 1 – Зависимость крутящего момента  $M_{KP}$  от частоты вращения  $n$  (подача  $S=0,1$  мм/об, диаметр сверла  $d=10$  мм)

В ходе анализа математической модели было установлено существенное влияние фазовой характеристики силы резания  $\tau$  на амплитуду колебаний (рисунок 2). Как известно, уменьшение величины  $\tau$  может быть достигнуто за счет увеличения скорости резания, величины переднего угла инструмента, уменьшения коэффициента усадки стружки. Полученные результаты согласуются с исследованиями вибраций при точении и фрезеровании, проведенные И.Г. Жарковым.

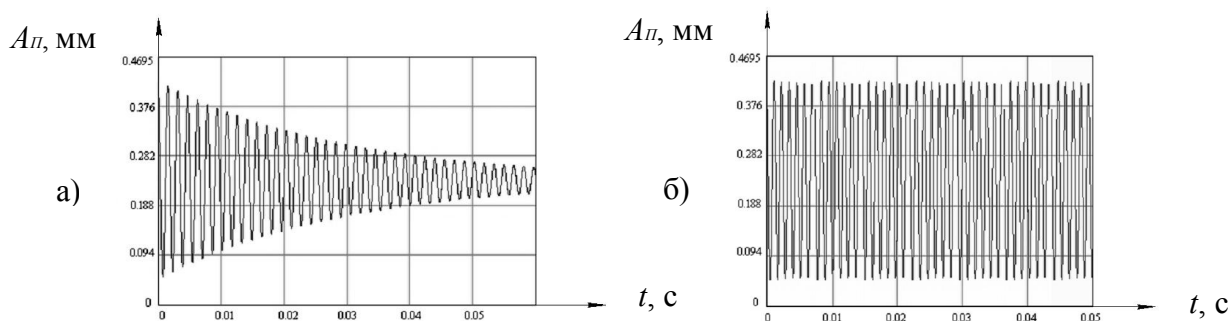


Рисунок 2 – Результаты расчета автоколебаний при сверлении а) – без учета и б) – с учетом фазовой характеристики силы резания  $\tau$

Таким образом, разработаны математическая модель процесса сверления и БД, позволяющие на ТПП прогнозировать параметры колебаний при сверлении для широкого диапазона типоразмеров сверл и режимов резания.

В **третьей главе** изучалась динамика процесса сверления при обработке отверстий в специальных образцах, изготовленных из серого чугуна СЧ-20 ГОСТ 1412-85, спиральными сверлами диаметром 10 мм ГОСТ 10903-77, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5. Пределы варьирования параметров режима резания: скорость резания  $V=0,102 \dots 0,392$  м/с (частота вращения  $n=195 \dots 750$  об/мин), подача  $S=0,1 \dots 0,47$  мм/об.

Для решения задач диссертационного исследования была разработана экспериментальная установка для проведения исследований динамики процесса сверления, включающая вертикально-сверлильный станок 2А135, специальные образцы из серого чугуна СЧ-20 для сверления (патент RU №84976), устройство для отвода сверла из зоны резания (патент RU №2354506).

Устройство для отвода сверла (рисунок 3) позволяет отводить сверло из зоны резания со скоростью превышающей скорость резания и достаточной для сохранения вибрационных волн на дне образца (рисунок 4).

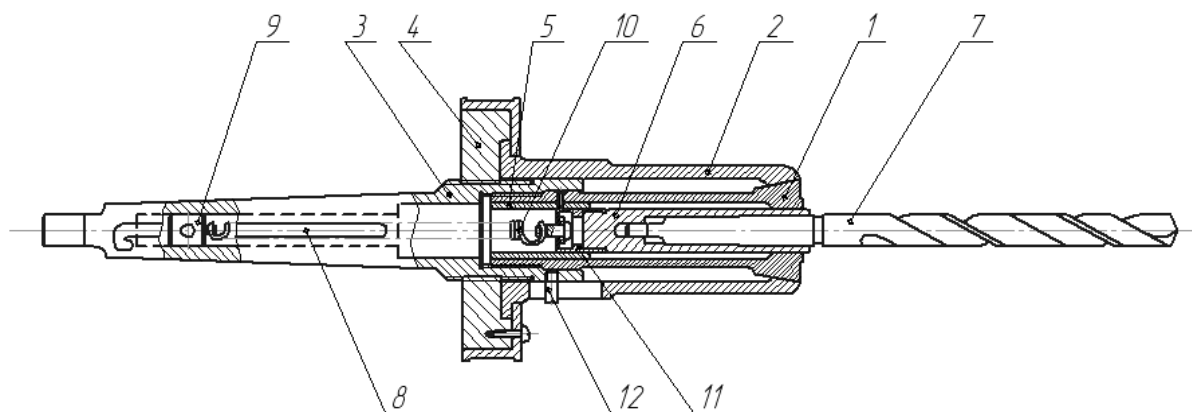


Рисунок 3 – Устройство для отвода сверла. 1 – внутренняя цанга, 2 – внешняя цанга, 3 – корпус, 4 – гайка, 5 – подпружиненный элемент, 6 – направляющая втулка, 7 – сверло, 8 – направляющий паз, 9 – ползун, 10 – пружина, 11 – сухарь, 12 – стопорный винт

В результате полного факторного эксперимента (ПФЭ)  $2^2$  были получены: степенная модель – зависимость амплитуды продольных колебаний  $A_n$  от скорости резания  $V$  и подачи  $S$ :

$$A_n = 0,27 \cdot V^{-0,39} \cdot S^{0,32}, \text{ мм} \quad (4)$$

и степенная модель – зависимость частоты продольных колебаний  $f_n$  спирального сверла от скорости резания  $V$  и подачи  $S$ :

$$f_n = 2708,73 \cdot V^{1,07} \cdot S^{-0,30}, \text{ Гц} \quad (5)$$

где  $V$  – скорость резания, м/с;  $S$  – подача, мм/об.



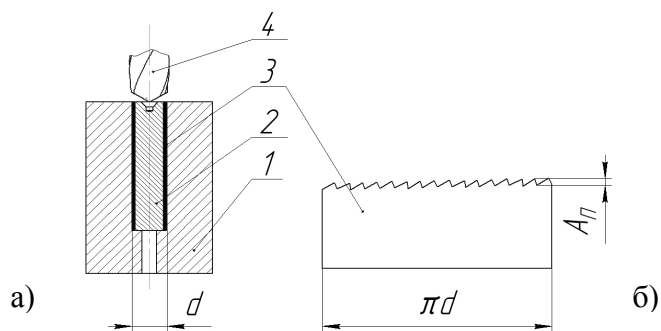


Рисунок 4 – Образец для сверления. а) – схема образца: 1 – тело образца, 2 – стержень, 3 – медная фольга, 4 – спиральное сверло, б) – медная фольга после распрессовки

Установлено, что спиральное сверло совершает колебания во всем исследуемом диапазоне режимов резания с частотой  $f_H = 190 \dots 1500$  Гц и амплитудой  $A_H = 0,2 \dots 0,5$  мм. Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с данными математической модели, относительная погрешность при определении амплитуды продольных колебаний  $A_H$  составила не более 14,7%. Это позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели процессу сверления.

Анализ работ А.А. Барзова, В.М. Баранова, Ю.Б. Дробота, А.В. Кибальченко, В.Н. Подураева, Н.Н. Рассказова, А.И. Свириденко и работ зарубежных авторов показал, что для исследования динамики процесса сверления может быть применен метод АЭ.

Для регистрации сигнала акустической эмиссии (САЭ) процесса резания использовалась экспериментальная установка, собранная на базе ЭВМ. В состав установки входит спиральное сверло 1, образец 2 для сверления, пьезокерамический датчик 3, зажимное приспособление 4 станка, усилитель 5, датчик оборотов 6, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7 и ЭВМ (рисунок 5а).

Для обработки САЭ процесса сверления была разработана специальная программа «Статистика акустического сигнала» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008611352).

Применение метода АЭ позволило определить амплитуду крутильных колебаний  $A_K$  спирального сверла. В ходе анализа записей САЭ процесса сверления было установлено отставание сигналов, соответствующих работе режущих кромок и ленточек спирального сверла от сигналов с датчика оборотов (рисунок 5б). Данное отставание САЭ – следствие раскручивания спирального сверла вокруг своей оси на некоторый угол раскручивания под действием крутящего момента.

В результате исследований динамики процесса сверления методом АЭ (ПФЭ 2<sup>2</sup>) была получена степенная модель – зависимость амплитуды крутильных колебаний  $A_K$  спирального сверла от скорости резания  $V$  и подачи  $S$ :

$$A_K = 12,32 \cdot V^{-0,28} \cdot S^{0,37}, \text{ градусы} \quad (6)$$

где  $V$  – скорость резания, м/с;  $S$  – подача, мм/об.

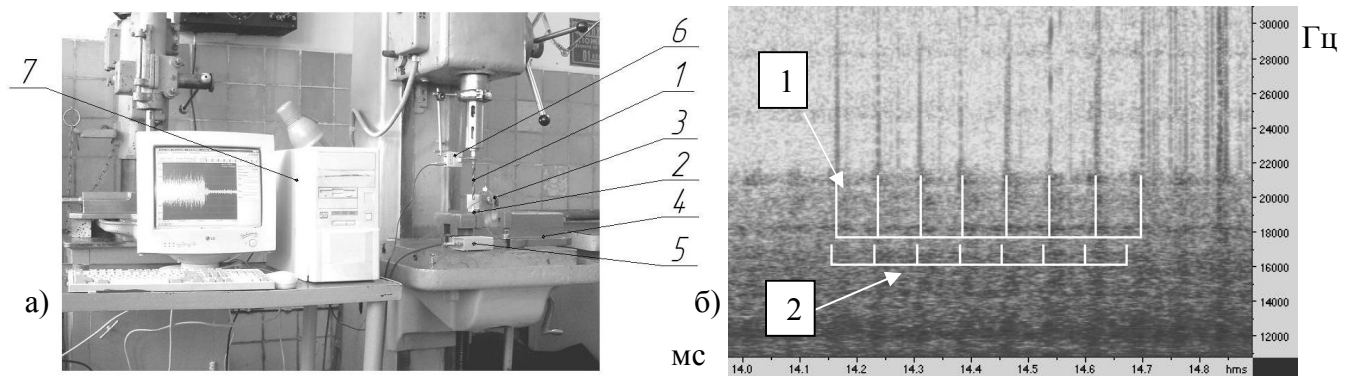


Рисунок 5. а) – общий вид экспериментальной установки. 1 – спиральное сверло, 2 – образец для сверления, 3 – пьезокерамический датчик, 4 – зажимное приспособление, 5 – усилитель, 6 – датчик оборотов, 7 – АЦП, ЭВМ. б) - увеличенный участок спектрограммы. 1 – риски соответствующие частотным всплескам в момент прохождения режущих кромок сверла вблизи преобразователя АЭ; 2 – разметка, построенная по сигналу с датчика оборотов

По известным формулам В.И. Денисенко была рассчитана амплитуда продольных колебаний спирального сверла:

$$A_{\Pi} = \frac{\int_{d_0}^d b_x \cdot \Delta l_x \cdot \partial(d_x)}{\frac{\pi d_0^2}{8} + \int_{d_0}^d b_x \cdot \partial(d_x)}, \text{ мм} \quad (7)$$

где  $d$  – диаметр сверла, мм;  $d_0$  – диаметр сердцевины, мм;  $b_x$  – длина дуги пера в минимальном разрезе на произвольном диаметре  $d_x$ , мм;  $\Delta l_x$  – удлинение единичного волокна относительно вершины сверла на произвольном диаметре  $d_x$ :

$$\Delta l_x = \frac{\sqrt{H^2 + (\pi d_x)^2} \cdot l_p}{H \cdot \cos\left(\frac{d_x A_K}{2H}\right) + \pi d_x \cdot \sin\left(\frac{d_x A_K}{2H}\right)} \left[ \frac{\pi d_x \cdot \sin\left(\frac{d_x A_K}{2H}\right)}{H} + \cos\left(\frac{d_x A_K}{2H}\right) - 1 \right], \text{ мм} \quad (8)$$

где  $H$  – длина шага спирали, мм;  $l_p$  – длина рабочей части сверла, мм;  $A_K$  – амплитуда крутильных колебаний, градусы.

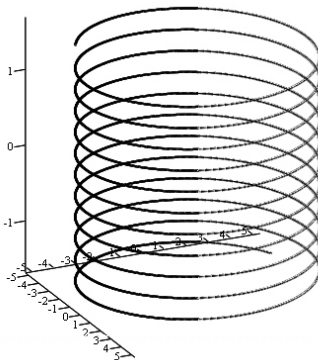
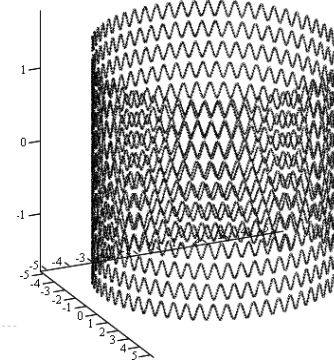
Таким образом, был разработан способ экспресс-определения параметров колебаний спирального сверла методом АЭ, позволяющий сократить трудоемкость определения оптимальных режимов резания.

В ходе литературного обзора, было установлено, что лимитирующим видом износа спирального сверла при обработке серого чугуна является износ по направляющим ленточкам и уголку. Исследование интенсивности износа направляющих ленточек спирального сверла проводилось на установке для физического моделирования процесса износа, спроектированной на основе моделирующих установок Г.И. Грановского. Установка для физического моделирования процесса износа размещалась на универсальном токарном станке модели 1К62 вместо резцедержателя. Экспериментальная установка обладает большей жесткостью ( $\approx 2,3 \cdot 10^7$  Н/м) в направлении оси индентора по сравнению с продольной жесткостью спирального сверла ( $\approx 1,5 \cdot 10^6$  Н/м). Конструкция установки для физического моделирования исключает возникновение колебаний, связанных с относительно низкой крутильной жесткостью спирального сверла ( $\approx 30$  Н·м/рад). Таким образом, экспериментальная установка позволила исследовать интенсивность износа ленточек спирального сверла в условиях отсутствия колебаний инструмента.

Для решения задачи, связанной с определением давления на ленточках спирального сверла, был разработан способ определения длины участка касания ленточками концевой инструмента поверхности обрабатываемого отверстия методом АЭ (патент RU №2395372). Для определения величины допустимого износа  $h_{\text{ПР}}$  было разработано устройство для управления процессом обработки отверстий (патент RU №2362655).

Как показал литературный обзор, увеличение интенсивности износа направляющих ленточек связано с увеличением пути, пройденным инструментом в условиях колебаний, поэтому для изучения влияния колебаний на стойкость спирального сверла проводилось моделирование траектории перемещения ленточек (таблица 2).

Таблица 2 – Расчет периода стойкости спирального сверла в условиях колебаний

| В условиях отсутствия колебаний инструмента                                                                                                                                                                                                                  | При наличии продольных колебаний инструмента                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Формулы для расчета координат точек траектории перемещения ленточки                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $x = r \cdot \cos(\omega t)$ , мм (9)                                                                                                                                                                                                                        | $x = r \cdot \cos(\omega t)$ , мм (14)                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $y = r \cdot \sin(\omega t)$ , мм (10)                                                                                                                                                                                                                       | $y = r \cdot \sin(\omega t)$ , мм (15)                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $z = \frac{S \cdot t}{2\pi}$ , мм (11)                                                                                                                                                                                                                       | $z = \frac{S \cdot t}{2\pi} + A_{\text{П}} \cdot \sin(\omega_{\text{П}} t)$ , мм (16)                                                                                                                                                                                                                       |
| где $r$ – радиус сверла, мм;<br>$\omega = 2\pi n$ – круговая частота ( $n$ – частота вращения, об/с), рад/с;<br>$S$ – подача, мм/об                                                                                                                          | где $A_{\text{П}}$ – амплитуда продольных колебаний, мм;<br>$\omega_{\text{П}} = 2\pi \cdot f_{\text{П}}$ – круговая частота продольных колебаний ( $f_{\text{П}}$ – частота продольных колебаний, Гц), рад/с.                                                                                              |
| Траектории                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                         |
| Рисунок 6                                                                                                                                                                                                                                                    | Рисунок 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Формулы для расчета длины отрезка кривой, пройденной за время $t$                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $L_1 = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial t}(r \cdot \cos(\omega t))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}(r \cdot \sin(\omega t))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{S \cdot t}{2\pi}\right)\right)^2} dt$ , мм (12) | $L_2 = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial t}(r \cdot \cos(\omega t))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}(r \cdot \sin(\omega t))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{S \cdot t}{2\pi} + A_{\text{П}} \cdot \sin(\omega_{\text{П}} t)\right)\right)^2} dt$ , мм (17) |
| Формулы для расчета периода стойкости $T$                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $T_1 = \frac{h_{\text{ПР}}}{60 \cdot I_{\text{Л}}}$ , мин (13)                                                                                                                                                                                               | $T_2 = \frac{L_1}{L_2} \cdot T_1 = \frac{L_1 \cdot h_{\text{ПР}}}{L_2 \cdot 60 \cdot I_{\text{Л}}}$ , мин (18)                                                                                                                                                                                              |
| где $h_{\text{ПР}}$ – величина допустимого износа по ленточке, мм;<br>$I_{\text{Л}}$ – интенсивность износа направляющих ленточек, мм/с                                                                                                                      | $\frac{L_1}{L_2}$ – отношение длин отрезков кривой, пройденных ленточками при наличии $L_2$ и в отсутствии колебаний инструмента $L_1$                                                                                                                                                                      |

Для описания интенсивности износа ленточек спирального сверла в зависимости от режимов резания на моделирующей установке был проведен ПФЭ 2<sup>2</sup> и получена степенная модель:

$$I_{\text{л}} = 82,41 \cdot V^{1,94} \cdot S^{1,70}, \text{ мкм/с} \quad (19)$$

Таким образом, были установлены зависимости между режимами резания и параметрами колебаний спирального сверла; установлено влияние режимных параметров на интенсивность износа направляющих ленточек спирального сверла, лимитирующих стойкость инструмента при обработке серого чугуна. Для расчета периода стойкости с учетом колебаний спирального сверла было получено уравнение (18).

**Четвертая глава** посвящена разработке методических основ для выбора оптимальных режимов резания при сверлении с использованием автоматизированного информационно-измерительного комплекса.

Алгоритм работы разработанного комплекса представлен на рисунке 8. Использование математической модели и БД в составе комплекса позволяет решать задачу по выбору оптимальных режимов резания на этапе ТПП с учетом параметров колебаний спиральных сверл различных типоразмеров для достижения заданной производительности и себестоимости обработки. Разработанный автоматизированный комплекс позволяет снизить трудоемкость проектирования операции сверления за счет автоматизации расчета выходных технологических параметров: основного времени  $T_o$ , стойкости инструмента  $T$ , штучно-калькуляционного времени  $T_{\text{шт-к}}$ , нормы выработки  $H_B$ , себестоимости  $C$ , а также параметров шероховатости  $Ra=f(d, V, S)$ ,  $Rz=f(d, V, S)$  в качестве технологических критериев при выборе режимов резания.

Автоматизированный информационно-измерительный комплекс для выбора оптимальных режимов резания при сверлении включает в себя:

- приспособления к металлорежущим станкам, позволяющие определить параметры колебаний спирального сверла при обработке (патенты RU №84976, RU №2354506);
- экспериментальную установку для экспресс-определения режимов резания при сверлении методом АЭ, включающую специальное программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008611352), способ определения длины участка касания ленточками концевой инструмента поверхности обрабатываемого отверстия (патент RU №2395372) и устройство для управления процессом обработки отверстий (патент RU №2362655);
- установку для физического моделирования процесса износа;
- программное обеспечение для автоматизации этапов проектирования операции сверления, включающее математическую модель процесса сверления и БД (свидетельства о государственной регистрации баз данных №2010620114, №2010620394).

Апробация результатов исследований производилась на участке механической обработки ОАО ХК «Барнаултрансмаш», при определении оптимальных режимов обработки отверстий в детали 501-16-9 «Картер верхний», изготовленной из серого чугуна СЧ-20. Параметры операции: обработка 42 отверстий с помощью многошпиндельной головки, станок горизонтально-сверлильный 4А906, глубина сверления  $t=30$  мм, диаметр отверстий  $8,3^{+0,22}$  мм, шероховатость  $Ra=12,5$  мкм, режимы резания: подача  $S=0,14$  мм/об, частота вращения  $n=750$  об/мин.

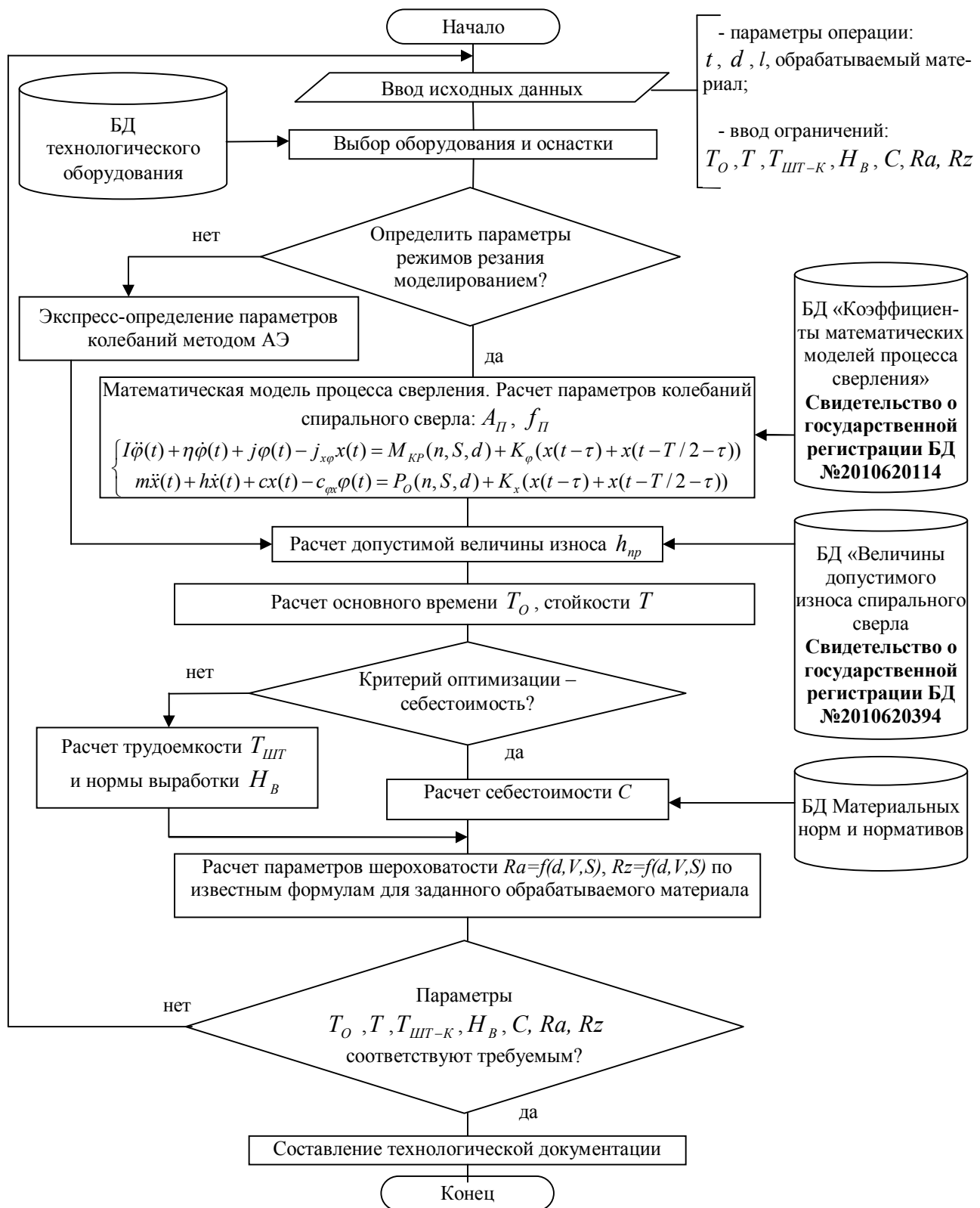


Рисунок 8 – Алгоритм работы автоматизированного информационно-измерительного комплекса для выбора режимов резания

После проведения анализа динамики процесса сверления определены оптимальные режимы резания по производительности (рисунок 9а):  $S=0,28$  мм/об  $n=530$  об/мин;  $S=0,36$  мм/об  $n=400$  об/мин; по себестоимости (рисунок 9б):  $S=0,28$  мм/об  $n=275$  об/мин;  $S=0,21$  мм/об  $n=400$  об/мин.

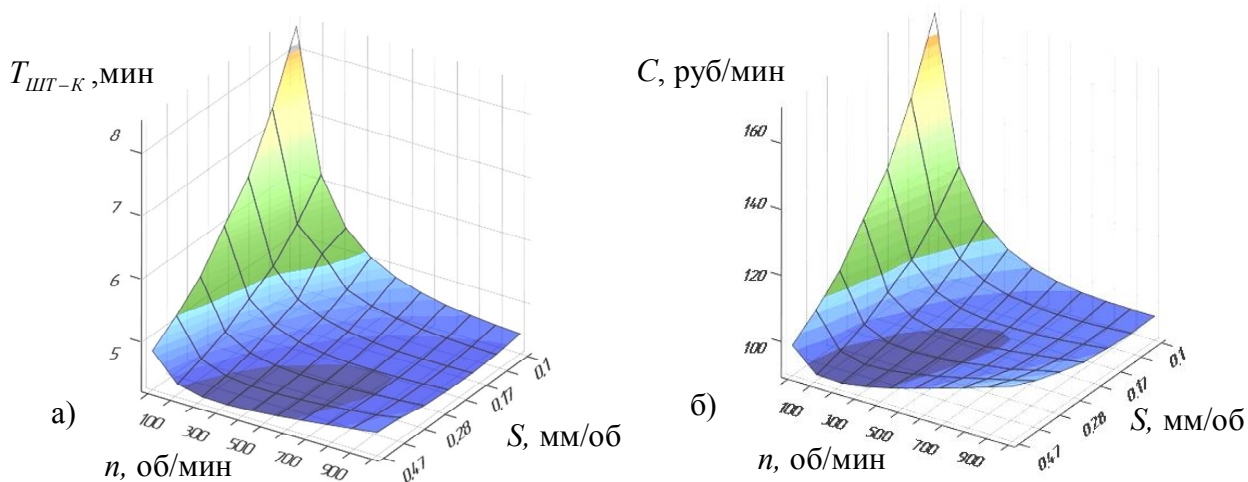


Рисунок 9 – Зависимости: а) – трудоемкости  $T_{шт-к}$  и б) – себестоимости  $C$  от частоты вращения  $n$  и подачи  $S$  при обработке детали «Картер верхний»

Проведенные производственные испытания показали работоспособность разработанных способов анализа динамического состояния процесса сверления, адекватность математической модели процесса сверления (1) и эмпирических зависимостей (4), (5) между параметрами колебаний инструмента и режимами резания. При этом были отмечены следующие технические преимущества: уменьшение основного времени обработки отверстий в детали «Картер верхний» с 0,42 до 0,3 мин (на 28,6%); уменьшение штучно-калькуляционного времени  $T_{шт-к}$  с 4,65 до 4,35 мин (на 6,45%).

Таким образом, в диссертационной работе решена актуальная задача, состоящая в повышении производительности и снижении себестоимости обработки отверстий спиральными сверлами путем выбора оптимальных режимов резания на основе анализа динамики процесса сверления с помощью автоматизированного информационно-измерительного комплекса.

### **Основные выводы и результаты работы**

1. Построенные расчетная схема и математическая модель процесса сверления, включающая расчет параметров стойкости спирального сверла на основе моделирования траектории перемещения инструмента с учетом параметров колебаний при механической обработке, являются эффективным средством проектирования технологических решений для обеспечения заданной производительности и себестоимости операции сверления на этапе ТПП.

2. Установленные зависимости между режимами резания, параметрами колебаний и интенсивностью износа спирального сверла, позволили разработать методические основы, алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного выбора режимов резания, включающие систему ограничений, учитывающих себестоимость и трудоемкость операции сверления.

3. Разработанная экспресс-методика выбора оптимальных режимов резания при сверлении, основанная на методе АЭ, включающая экспериментальную установку для экспресс-определения режимов резания при сверлении и специальное программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008611352), способ определения длины участка касания ленточками концевой инструмента поверхности обрабатываемого отверстия (патент RU №2395372) и устройство для управления процессом обработки отверстий (патент RU №2362655), позволяет сократить трудоемкость проектирования операции сверления.



4. Разработанный автоматизированный информационно-измерительный комплекс для выбора оптимальных режимов резания при сверлении, включающий специальные приспособления к металлорежущим станкам, (патенты RU №84976, RU №2354506); установку для физического моделирования процесса износа; программное обеспечение для автоматизации этапов проектирования операции сверления, включающее математическую модель процесса сверления и БД (свидетельства о государственной регистрации баз данных №2010620114, №2010620394), обеспечивает выбор технологических решений, направленных на повышение производительности и снижение себестоимости механической обработки отверстий.

5. Производственные испытания автоматизированного комплекса на ОАО ХК «Барнаултрансмаш» позволили повысить производительность операций сверления отверстий на 5...10%, в том числе с применением многошпиндельных головок на 6...8%, при обработке номенклатуры деталей, изготовленных из серого чугуна СЧ-20. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения составляет 250000 рублей.

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Кряжев, Ю. А.** Исследование колебательных процессов, возникающих при работе спирального сверла, с применением анализа акустического сигнала [Текст] / Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко // Технология машиностроения. – 2008. – №1. – С. 28 – 29.

2. **Огневенко, Е. С.** Исследования деформации спирального сверла методом виброакустической эмиссии [Текст] / Е. С. Огневенко // СТИН. – 2008. – №3. – С. 15 – 17.

3. **Огневенко, Е. С.** Экспериментальное исследование колебательных процессов, возникающих при работе спирального сверла, методом виброакустической эмиссии [Текст] / Е. С. Огневенко // Контроль. Диагностика. – 2008. – №4. – С. 59 – 62.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации:**

4. **Огневенко, Е. С.** Связь параметров и режимов обработки осевым инструментом с параметрами акустической эмиссии на примере спирального сверла [Текст] / Е. С. Огневенко // Обработка металлов. – 2007. – №3. – С. 13 – 15.

5. **Кряжев, Ю. А.** Определение деформации спирального сверла методом акустического излучения [Электронный ресурс] / Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко // Наука и молодежь – 2007 : 4-я Всероссийская науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Барнаул, АлтГТУ, апрель 2007 г.). – Барнаул. – 2007. – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/media/f/otmsod.pdf>

6. **Кряжев, Ю. А.** Разработка системы акустическо-эмиссионного контроля процессов обработки отверстий стержневым инструментом [Текст] / Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко // Материалы IX-й городской науч.-практ. конф. молодых ученых «Молодежь – Барнаулу», б.и., – Барнаул. – 2007. – С. 236 – 238.

7. **Кряжев, Ю. А.** К вопросу о выборе уровня дискриминации при обработке сигналов акустической эмиссии [Электронный ресурс] / Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко // Наука и молодежь – 2008 : 5-я Всероссийская науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Барнаул, АлтГТУ, апрель 2008 г.). – Барнаул. – 2008. – Режим доступа: [http://edu.secna.ru/media/f/mtoa\\_otm.pdf](http://edu.secna.ru/media/f/mtoa_otm.pdf)

8. **Огневенко, Е. С.** Технологические предпосылки использования сигнала акустической эмиссии для прогнозирования износа инструмента [Электронный ресурс] / Е. С. Огневенко, В. А. Терентьев, Ю. А. Кряжев // Наука и молодежь – 2008 : 5-я Все-

российская науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Барнаул, АлтГТУ, апрель 2008 г.). – Барнаул. – 2008. – Режим доступа: [http://edu.secna.ru/media/f/mtoa\\_otm.pdf](http://edu.secna.ru/media/f/mtoa_otm.pdf)

**9. Брызгалов, Е. А.** Исследование контактных процессов на передней поверхности спирального сверла [Электронный ресурс] / Е. А. Брызгалов, Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко // Наука и молодежь – 2009 : 6-я Всероссийская науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Барнаул, АлтГТУ, апрель 2009 г.). – Барнаул. – 2009. – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/media/f/otm.pdf>

**10. Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008611352 «Статистика акустического сигнала» (САС) [Текст] / Е. С. Огневенко, А. Ю. Новомирский, Ю. А. Кряжев ; заявитель и патентообладатель Алтайский гос. техн. ун-т. им. И. И. Ползунова. – заявка № 2008610344 от 01.02.2008 ; опубл. 18.03.2008.

**11. Свидетельство** о государственной регистрации базы данных №2010620114 «Коэффициенты математических моделей процесса сверления» (КММПС) [Текст] / Ю. А. Кряжев, А. В. Балашов, Е. В. Титова, Е. С. Огневенко ; заявитель и патентообладатель Алтайский гос. техн. ун-т. им. И. И. Ползунова. – заявка № 2009620692 от 23.12.2009 ; опубл. 17.02.2010.

**12. Свидетельство** о государственной регистрации базы данных №2010620394 «Величины допустимого износа спирального сверла» (ВДИСС) [Текст] / Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко, Е. В. Титова ; заявитель и патентообладатель Алтайский гос. техн. ун-т. им. И. И. Ползунова. – заявка № 2010620259 от 04.06.2010 ; опубл. 23.07.2010.

**13. Пат. 84976 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 Н 1/00.** Образец для измерения параметров автоколебаний спирального сверла [Текст] / Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко ; заявитель и патентообладатель Алтайский гос. техн. ун-т. им. И. И. Ползунова. – № 2009111871/22 ; заявл. 31.03.2009 ; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20.

**14. Пат. 2354506 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 В 47/00.** Устройство для отвода сверла [Текст] / Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко ; заявитель и патентообладатель Алтайский гос. техн. ун-т. им. И. И. Ползунова. – № 2007135892/02 ; заявл. 27.09.2007 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.

**15. Пат. 2362655 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 В 47/24.** Устройство для управления процессом обработки отверстий [Текст] / Ю. А. Кряжев, Е. С. Огневенко ; заявитель и патентообладатель Алтайский гос. техн. ун-т. им. И. И. Ползунова. – № 2007144160/02 ; заявл. 27.11.2007 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 21.

**16. Пат. 2395372 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 В 35/00.** Способ определения длины участка касания ленточками концевой инструмента поверхности обрабатываемого отверстия в процессе резания [Текст] / Е. С. Огневенко, Ю. А. Кряжев, Е. В. Титова ; заявитель и патентообладатель Алтайский гос. техн. ун-т. им. И. И. Ползунова. – № 2009111965/02 ; заявл. 31.03.2009 ; опубл. 27.07.2010, Бюл. № 21.

Подписано в печать 16.11.2010. Формат 60x84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 0,93.

Тираж 100 экз. Заказ 2010 - 617

Отпечатано в типографии АлтГТУ,  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46  
тел.: (8–3852) 36–84–61

Лицензия на полиграфическую деятельность  
ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.