

М 311800

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ПУСЬКОВ Александр Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ИНСТРУМЕНТА ПРИ ГЛУБОКОМ СВЕРЛЕНИИ

(01.02.06. Динамика, прочность и надежность машин, приборов,
аппаратуры)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ГУСЬКОВ Александр Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ИНСТРУМЕНТА ПРИ ГЛУБОКОМ СВЕРЛЕНИИ

(01.02.06. Динамика, прочность и надежность машин, приборов,
аппаратуры)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1311800

Гуськов А.М. Исследование

Работа выполнена в МВТУ им.Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - д.т.н. профессор В.А.Светлицкий.

Официальные оппоненты:

д.т.н. профессор В.А.Кудинов

к.т.н.ст.научн.сотр. А.И. Ушаков

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Защита диссертации состоится "17" марта 1977 г.
на заседании специализированного Совета по динамике и прочности
машин Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Зна-
мени высшего технического училища им.Н.Э. Баумана по адресу:
Москва 107003, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваше отзыв в 2-х экземплярах, заверенные печатью, прось-
ба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Училища.
Автореферат разослан "16" февраля 1977 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

д.т.н. профессор

Н.А.АЛФУТОВ

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Л-79418 от 8/II-77 г. Объем - 1 п.л. Тип. МВТУ. Зак. 323 Тир. 100

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Актуальность. В директивах XIX съезда КПСС об основных направлениях развития народного хозяйства СССР подчеркивается особая роль совершенствования технологических процессов, в частности, развития прогрессивной малооперационной технологии. Метод глубокого сверления позволяет за один проход достигнуть требуемого качества поверхности отверстия. В настоящее время область применения глубоких и точных отверстий все более расширяется. Детали с глубокими отверстиями изготавливаются во многих областях машиностроения: в авиастроении, судостроении, нефтемашиностроении, турбостроении и т.д.

Технология изготовления глубоких отверстий имеет ряд специфических особенностей. Наличие длинного гибкого стебля инструмента способствует появлению вибраций, влияющих на стойкость инструмента и качество отверстий. Актуальной задачей технологии обработки глубоких отверстий является определение условий возникновения вибраций инструмента и снижение их уровня или, наоборот, использования вибраций для достижения максимальной производительности операции. Решение этой задачи связано с исследованием сложных динамических процессов при глубоком сверлении.

Цель работы. Основной целью настоящей работы является: 1) Определение условий возбуждения крутильных и изгибных автоколебаний инструмента при глубоком сверлении, теоретическое определение режимов безвибрационного сверления. 2) Распространение методов теории подобия и размерности на процессы образования и удаления стружки для сравнения устойчивости колебаний стебля инструмента при сверлении отверстий различных диаметров.

Основные идеи, сформулированные в работе и их новизна.

Основная идея работы сводится к определению критических значений параметров, характеризующих процесс глубокого сверления, при которых стебель инструмента теряет устойчивость. В частности, определяется критическая глубина сверления. Решение этой задачи находится из рассмотрения математических моделей крутильных и изгибных колебаний стебля как системы с распределенными параметрами.

При исследовании крутильных автоколебаний стебля инструмента новизна заключается в следующем: во-первых, стебель рассмотрен как система с распределенными параметрами; во-вторых,

учитывается нелинейность характеристики трения между направляющими планками и поверхностью отверстия; в-третьих, сформулирована задача об оценке влияния колебаний стебля на режимы резания.

При рассмотрении устойчивости изгибных колебаний стебля новым является учет динамических свойств масляного слоя, образованного осевым потоком смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) между поверхностью отверстия и наружной поверхностью стебля (метод сверления с внутренним отводом стружки). Впервые решается задача об определении сил гидродинамического взаимодействия стебля инструмента с потоком СОЖ. На созданной экспериментальной установке проверены результаты теоретических исследований.

С аналитическим исследованием колебаний стебля тесно связан вопрос сравнения устойчивости различных процессов глубокого сверления; в частности, сверления отверстий различных диаметров. Кроме того, силы резания входят в уравнения, определяющие движение стебля. Однако их экспериментальные значения невозможно использовать, так как форма записи не удовлетворяет принципу однородности по размерностям. Для возможности практического использования результатов исследования устойчивости колебаний инструмента в данной работе впервые применены методы теории подобия и размерности к процессам образования и удаления стружки.

Методы исследования. 1) При исследовании крутильных автоколебаний построена модель крутильных колебаний распределенной упругой системы. Поиск периодических решений произведен с помощью метода Пуанкаре-Лямбета, получен алгоритм для бесконечного числа степеней свободы. При количественной оценке решения произведена дискретизация с помощью метода Галеркина. Рассмотрена система с минимально возможным числом степеней свободы - с двумя степенями. Осуществлена экстраполяция решения на основе метода теории подобия.

2) Определение гидродинамических сил произведено в предположении, что жидкость ньютонова и несжимаемая. Решение получено с помощью методов возмущений с перенесением крайних условий на недеформированную поверхность (метод разработан в работах Ван-Дайка и И.Лайтхилла). Показано, что при отсутствии осевой скорости жидкости и гибкости стержня уравнения нулевого прибли-

жения совпадают с уравнениями классической теории гидродинамической смазки. Используя метод асимптотического разложения, найдены условия, когда связанная задача гидроупругости расщепляется.

3) При исследовании изгибных колебаний стебель рассматривается как прямой стержень. Изучение свойств масляного слоя проведено с помощью метода возмущений (в комбинации с методами Релея-Фредингера и Галеркина). Дана оценка возможности применения метода Галеркина и рассматриваемой задачи (так как сходимость метода Галеркина в общем случае для неконсервативных систем недоказана, а имеются лишь частные решения - В.В. Болотин, С. Прасад, М. Левинсон, Г. Лейпхольц и др.). Исследование нелинейных колебаний стержня при переходе через границу области устойчивости произведено с помощью метода многих масштабов (А. Наифа, Д. Коул и др.).

В итоге исследование бесконечномерной системы сведено к рассмотрению двухстепенной модели, позволяющей сохранить все существенные свойства модели.

Апробация. Результаты исследования доложены на трех научно-технических конференциях и опубликованы в двух статьях.

Методика определения режимов резания с применением теории подобия и размерности внедрена в промышленности.

Содержание работы

Диссертация состоит из шести глав, списка литературы и семи приложений.

Исследованиям динамических процессов при глубоком сверлении постоянно уделяется большое внимание. В настоящее время имеется много работ, где освещены различные стороны сложных механических явлений, сопровождающих обработку глубоких отверстий. Созданы многочисленные модели, где учтены запаздывания в силах резания и при обработке "по следу", запаздывание, связанное с движением направляющих планок по обработанной поверхности; где предполагается связь между продольными и крутильными колебаниями стебля инструмента и т.п. Эти вопросы посвящены работы В.А. Абрамочкина, В.И. Астанина, В.Н. Подураева, А.И. Унакова, М.А. Царенко и др. Среди иностранных авторов можно отметить работы Б. Гройера, Г. Пирсона и др. Характерным является то, что указанная множественность моделей

как правило, подтверждается специальными экспериментами. Дело в том, что процессы глубокого сверления определяются большим числом параметров и в зависимости от сочетания их значений преобладающее значение приобретает та или иная сторона процесса глубокого сверления. В первой главе проведен анализ экспериментальных исследований, результаты которых не укладываются в известные ранее математические модели динамических процессов:

1) В опытах Сакума Кейцзо наблюдались значительные высокочастотные колебания крутящего момента в зоне крепления стебли инструмента при постоянной осевой силе резания. Что может быть обеспечено влиянием трения на направляющих планках.

2) В работах Ф.Игараси, Г.Г. Иноземцева, М.А. Царенко, Е. Динглингера приводятся экспериментальные данные по влиянию СОЖ на устойчивость стебля инструмента. Указывается, что при определенных давлениях жидкости стебель инструмента может расшатываться или, наоборот, его колебания демпфируются, или, даже повышается статическая устойчивость стебля.

Крутильные и изгибные колебания возникают от различных причин. Однако, не ясно, при каких условиях они возникают. Возможно ли достижение такой глубины отверстия, когда возбуждятся колебания? Какие колебания возникнут при меньшей глубине? и т.д. При исследовании динамических моделей и определение оптимальных условий работы необходимо иметь критерии сравнения различных процессов глубокого сверления, необходимо иметь в явном виде зависимости сил резания от толщины стружки, диаметра отверстий и др. параметров. Имеющиеся экспериментальные зависимости не могут быть эффективно использованы в теоретических исследованиях, т.к. не выполняется принцип однородности по размерностям. Устранить указанные трудности можно, используя методы теории размерности и подобия.

Таким образом в работе были сформулированы следующие задачи:

- 1) Разработать методы размерности и подобия к определенным подобным процессам глубокого сверления;
- 2) Исследовать крутильные автоколебания стебля инструмента;
- 3) Определить силы гидродинамического взаимодействия

стебля инструмента с потоком СОЖ;

4) Исследовать устойчивость изгибных колебаний стебля с учетом гидродинамических сил;

5) Получить прогнозирующие зависимости для определения динамических эффектов при колебаниях стебля для подобных процессов глубокого сверления.

Вторая глава посвящена применению методов теории подобия и размерности к описанию процессов образования и удаления стружки при глубоком сверлении. При использовании методов теории подобия и размерности определяется набор параметров, характеризующих явление. Тем самым выбирается модель явления. Используя принцип однородности по размерностям и некоторые экспериментальные данные, получен вид зависимостей для сил резания в форме, пригодной к использованию в любой системе единиц. В случае необходимости принятый набор определяющих параметров может быть изменен и дополнен. В основу подобия процессов стружкоудаления положена гипотеза о подобии условия обтекания стружки потоком СОЖ. Допустим, что при сверлении отверстия радиуса R заданы значения осевой скорости сверла относительно детали V_s , угловой скорости вращения сверла относительно детали ω , средней скорости расхода СОЖ в стружководящем канале V_0 и известно значение осевой силы P и крутящего момента M от сил резания. Тогда при сверлении отверстия радиусом $\bar{R} = kR$ параметры $\bar{V}_s$, $\bar{\omega}$, $\bar{V}_0$ могут быть выбраны, вообще говоря, произвольным образом. И существует множество значений $\bar{V}_s$, $\bar{\omega}$, $\bar{V}_0$, при которых процесс сверления будет идти удовлетворительно. Не обладая дополнительной информацией о процессах, сопровождавших сверление, значения $\bar{V}_s$, $\bar{\omega}$, $\bar{V}_0$ выбираются только на основе эмпирических данных. Однако, используя условия подобия физических процессов, можно указать единственные значения параметров $\bar{V}_s$, $\bar{\omega}$, $\bar{V}_0$, при которых сверление отверстия радиусом kR будет протекать физически подобным образом. В частности, для сверления отверстий в деталях из одного и того же материала имеет место следующее преобразование подобия π :

$$\pi: \{R, V_s, \omega, V_0, P, M\} \rightarrow \left\{kR, V_s, \frac{\omega}{k}, \frac{V_0}{k}, k^2P, k^3M\right\}. \quad (1)$$

То есть, для подобных процессов осевая подача сохраняет свое

значение, а угловая скорость изменяется обратнопропорционально радиусу отверстия: скорость резания остается неизменной.

Применение только методов теории подобия не позволяет определить границы областей изменения определяющих параметров, внутри которых пригодна рассматриваемая модель. Для того, чтобы выявить границы применимости выбранной модели процесса, нужно рассмотреть другую модель, включающую в себя, как частный случай, первоначальную. Именно с этих позиций в данной работе рассматривается исследование динамики стебля инструмента. Расширенная модель — колеблющийся стебель нагруженный силами резания и гидродинамическими силами — обладает новыми свойствами, связанными с колебаниями стебля. Пределы применимости модели сил резания определяются из условия, что система находится на границе области устойчивости. Сравнивается устойчивость только подобных процессов.

В третьей главе при исследовании крутильных автоколебаний стебля уравнение крутильных колебаний совместно с нелинейными краевыми условиями (нелинейная характеристика трения между направляющими планками и поверхностью отверстия) приведено к виду, удобному для применения методов теории возмущений. В качестве возмущения рассматривается дополнительный момент сил трения, появляющийся при крутильных колебаниях стебля. Особенность модели заключается в том, что порождающая система обладает внутренними резонансами. Периодическое решение порождающей системы содержит бесчисленное множество гармоник. Причиной возбуждения автоколебаний здесь считается падающая зависимость коэффициента трения от скорости скольжения. Построен алгоритм нахождения периодических решений. В итоге рассматривается двухстепенная модель и сравнивается значение амплитуд автоколебаний для различных, но подобных процессов глубокого сверления. На рис. 1 и рис. 2 приведены зависимости динамических составляющих безразмерной скорости резания $\bar{V}$ и безразмерного крутящего момента $\bar{M}_k$ в месте крепления стебля в функции от безразмерного времени τ . Пунктиром показаны их значения при $k = 1,5$ для сверла, длина которого увеличена в полтора раза. При этом оказывается, что условие возбуждения автоколебаний не зависит от длины стебля, а определяется только характеристикой трения. Для определения безвибрационных режимов резания необходимо знать характеристику трения.

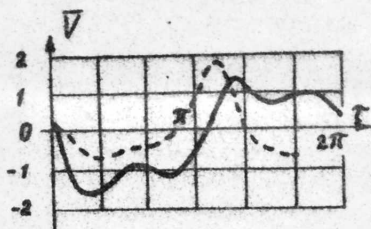


Рис. 1

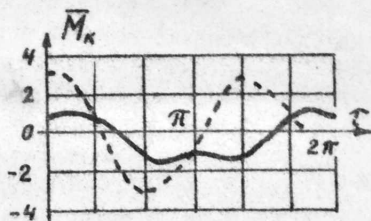


Рис. 2

В четвертой главе определены силы гидродинамического взаимодействия стебля инструмента с потоком СОЖ в кольцевом слое. Решение уравнений гидродинамики получено в виде разложения по степеням малого параметра, которым является относительная величина радиального зазора между поверхностью отверстия и поверхностью стебля. Показано, что для отверстий, глубина которых превышает диаметр более чем в тридцать раз можно пренебречь влиянием граничных условий (краевые эффекты вблизи зоны резания и входа в отверстия). Тем самым связанная задача гидроупругости решается раздельно; выражения для гидродинамических сил получены в явном виде в функции от поперечных перемещений оси стебля. В результате чего получено уравнение изгибных колебаний стебля инструмента с учетом взаимодействия с потоком СОЖ. В безразмерном виде уравнение имеет вид:

$$\ddot{\bar{x}}'' + \ddot{\bar{x}}'' + \alpha \bar{x}'' + \beta \bar{x}' - \gamma \bar{x} - \frac{\alpha}{6} \bar{x}^2 \bar{x}' + \frac{\beta}{12} (\bar{x}')^2 \bar{x} = 0, \quad (2)$$

где $\bar{x}$ — безразмерный прогиб от стебля; α — безразмерная сила сжатия стебля; α — безразмерная скорость СОЖ в осевом направлении; β — безразмерный коэффициент демпфирования; γ — безразмерное среднее вращение сверла и детали; штрих означает производную по осевой координате, точка — по времени;

$$B = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Предложенный метод решения позволил определить нелинейные составляющие гидродинамических сил — последние два слагаемых в уравнении (2).

В пятой главе изучена динамическая устойчивость изгибных колебаний стебля инструмента с учетом гидродинамических сил, т.е. исследуются решения уравнения (2) при соответствую-

ших краевых условиях. Если в системе отсутствует среднее вращение границ масляного слоя ($\gamma = 0$) и осевое течение СОЖ ($\alpha = 0$), то взаимодействие с жидкостью сводится только к появлению демпфирующих сил. При этом стебель может потерять только статическую устойчивость при эйлеровом значении осевой силы. Если имеется среднее вращение сверла и детали $\gamma = \frac{\omega_0 + \omega_{00}}{2}$ (ω_0 — угловая скорость вращения сверла, ω_{00} — угловая скорость вращения детали), то возможно появление автоколебаний в виде прямой полусинхронной прецессии. При этом примерно выполняется равенство $\omega_0 + \omega_{00} = 2\omega_1$, где ω_1 — первая собственная частота изгибных колебаний стебля. Наличие осевой скорости СОЖ ($\alpha \neq 0$) увеличивает как величину критической силы статического выпучивания так и значение среднего вращения, при котором возникает прецессия. Однако, эффекты стабилизации проявятся лишь до определенных значений скорости жидкости — α^* , α_* (рис. 3).

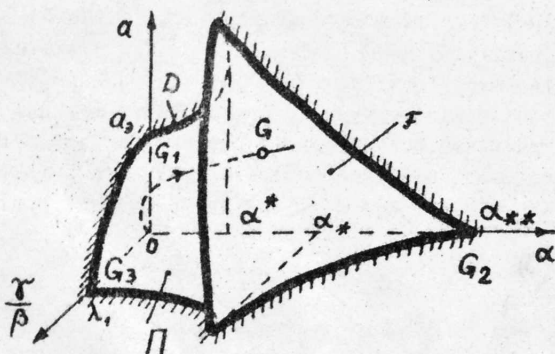


Рис. 3

На рис. 3 изображена область устойчивости стебля инструмента в пространстве безразмерных параметров (α , α_2 , γ/β), где α_2 — эйлерово значение сжимающей силы; λ_1 — безразмерная первая собственная частота изгибных колебаний стебля; линия D — граница статического (дивергенция) выпучивания стебля; поверхность Π — граница прямой полусинхронной прецессии стебля. Из рис. 3 видно, что при отсутствии осевой силы и среднего вращения имеется пересечение с поверхностью F . Переход через границу F приводит к возникновению флаттера стебля инструмента. Пунктиром показана траектория рабочей точки в процессе

сверления одного отверстия (при этом изменяется длина стебля, находящегося в отверстии). Как следует из рисунка, всегда имеется точка пересечения траектории - G_1 - с границей области устойчивости стебля. Проведенный анализ нелинейных колебаний стебля при переходе границы устойчивости вблизи точек $G_{12}(\alpha=\gamma=0)$, $G_1(\alpha=\alpha=0)$, показал, что при $\alpha > \alpha_{к.к.}$ и $\gamma > \lambda_1\beta$, в системе устанавливаются автоколебания с известной частотой и амплитудой, которые при дальнейшем увеличении α и γ не сature-хают.

В работе приведены уравнения границ $\mathcal{D}$, $\mathcal{N}$ и $\mathcal{T}$ и по известным значениям осевой силы, скорости потока СОЖ и величины среднего вращения детали и сверла всегда можно определить критическую глубину отверстия, при которой стебель потеряет устойчивость. Используя преобразования подобия (I) для параметров α , α , γ , можно определить значение критической глубины для отверстия радиусом kR ; глубина увеличится в n раз. На рис. 4, 5, 6 приведены зависимости $n(k)$ для случаев перехода через границу устойчивости в точках G_1 , G_2 , G_3 соответственно:

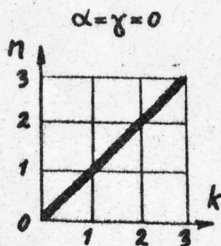


Рис. 4



Рис.5

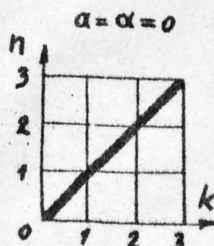


Рис.6

В шестой главе проверена справедливость преобразования подобия (I) на основе экспериментальных данных фирмы "Сэндвик". На рис. 7, 8 пунктирные линии 1 и 2 получены экспериментально.

На линии 1 выбраны две произвольные точки A и B , через них проведены линии подобных процессов 3, 4. Далее определены точки A' , B' (треугольники), которым соответствует подача на оборот $0,25 \text{ мм/об}$ и при этом найдены соответствующие значения диаметров отверстий. При этих же значениях

диаметров определены точки A'' и B'' на экспериментальных линиях 2. Совпадение результатов удовлетворительное.

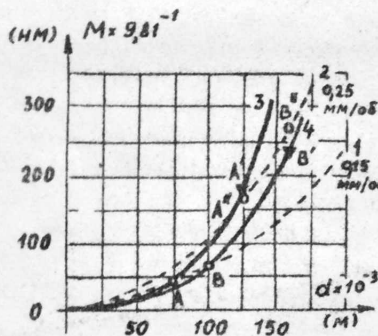


Рис. 7

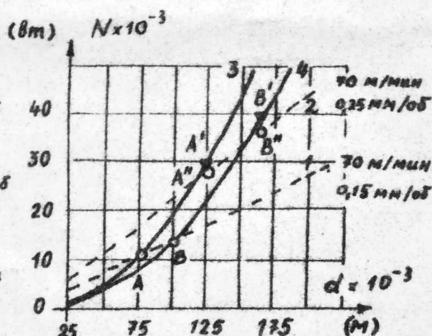


Рис. 8

На экспериментальной установке проверены также результаты исследования устойчивости изгибных колебаний цилиндрического стержня с учетом гидродинамических сил. Результаты сравнительного эксперимента приведены на рис. 9

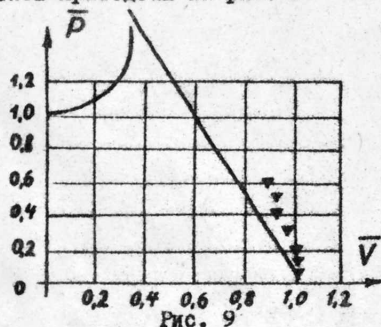


Рис. 9

За единицу относительной осевой силы сжатия $\bar{P}$ принято эйлерово значение силы. За единицу относительной скорости потока жидкости $\bar{V}$ принято наибольшее значение скорости флаттера жидкости. Треугольниками обозначены экспериментальные данные.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. В диссертации доказано, что при глубоком сверлении по методу "ВТА" всегда существует критическая глубина отверстия, при которой стержень инструмента теряет устойчивость. Неустойчивость может проявиться в виде выпучивания, прямой полусинхронной прецессии или в виде изгибных колебаний стержня (флаттера).

2. Наиболее опасным дестабилизирующим фактором является среднее вращение сверла и детали, которое снижает критическую силу сжатия и критическую скорость потока СОЖ. Наилучших условий работы можно добиться, когда среднее вращение равно нулю, при этом деталь и сверло вращаются навстречу и скорость вращения сверла несколько меньше скорости вращения детали.

3. Показано, что за счет осевого потока СОЖ можно добиться стабилизации стебля: критическая сила сжатия увеличивается в полтора - два с половиной раза в зависимости от условий закрепления. В то же время при любом значении осевой силы может возникнуть динамическая неустойчивость - флаттер - стебля - инструмента.

4. Исследование нелинейных колебаний стебля вблизи границы области устойчивости позволило: 1) определить амплитуду и частоту предельных циклов системы; 2) исследовать устойчивость предельных циклов и установить, что предельные циклы неустойчивые.

5. В результате исследования крутильных автоколебаний стебля определены истинная скорость резания и значение крутящего момента вблизи стеблевой бабки с учетом динамической податливости стебля.

6. Показано, что амплитуда изменения скорости резания и крутящего момента не зависят от длины стебля и полностью определяются моментом трения в зоне резания. В работе приведена методика определения опасной области на характеристике трения, основанная на обработке экспериментальных данных по методу наименьших квадратов.

7. Разработаны методы теории подобия и размерности применительно к глубокому сверлению. Это позволило сформулировать задачу исследования движения стебля инструмента как задачу определения критической глубины сверления для подобных процессов образования и удаления стружки.

8. Для подобных процессов глубокого сверления математически определены: критическая глубина отверстия, значения амплитуды и частоты крутильных автоколебаний стебля инструмента.

9. В диссертации решена задача об определении сил гидродинамического взаимодействия гибкого стержня с тонким масляным слоем. На созданной экспериментальной установке проверены следствия полученного решения.

Результаты работы доложены и обсуждены на симпозиуме по

прикладной механики МВТУ им. Н.Э.Баумана и Варшавского политехнического института – октябрь 1976 г.; на научной и методическом семинаре кафедры "Сопротивление материалов" МВТУ им. Н.Э.Баумана – декабрь 1976 г..

Основное содержание диссертации опубликовано в статьях:

1. Гуськов А.М. Анализ возможных причин возникновения автоколебаний при глубоком сверлении. Изв. ВУЗов "Машиностроение", № 10, 1974, с.145-149.
2. Светлицкий В.А., Гуськов А.М. Автоколебания гибкого стержня в масляном слое. Изв. ВУЗов "Машиностроение", № 12, 1974, с. 48-52.