

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения
(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Исследование технологии сухого электростатического охлаждения
при лезвийной обработке»

Студент

А. И. Луханина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.н.т, доцент, А. А Козлов

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Содержание

Введение.....	3
1 Применение технологии сухого электростатического охлаждения при механической обработке для повышения эффективности	5
1.1 Применение сухого электростатического охлаждения	5
1.2 Принципы технологии сухого электростатического охлаждения	11
1.3 Влияние электростатического охлаждения на износ инструмента	16
1.4 Влияние электростатического охлаждения на силу резания.....	20
1.5 Влияние электростатического охлаждения на геометрическую точность.....	22
1.6. Влияние электростатического охлаждения на поверхность.....	24
2 Газодинамическое моделирование сопла установки сухого электростатического охлаждения.....	28
2.1 Постановка задачи.....	28
2.2 Построение сетки	38
2.3 Назначение исходных данных	45
2.4 Представление результатов.....	50
2.5 Анализ результатов	58
3 Экспериментальная часть.....	63
3.1 Описание экспериментальной установки.....	63
3.2 Влияние сухого электростатического охлаждения на силу резания	65
3.3 Влияние сухого электростатического охлаждения на коэффициент деформации стружки	66
3.4 Влияние сухого электростатического охлаждения на температуру резания.....	68
3.5 Влияние сухого электростатического охлаждения на форму стружки.....	71
3.6 Влияние сухого электростатического охлаждения на износ инструмента.....	73
Заключение	76
Список используемых источников.....	77

Введение

Важным фактором по качеству детали является способ охлаждения зоны резания заготовки, так как он сказывается не только на процессе, но и на зоне обслуживания резания, так как возникает высокая температура резания и силы трения. Это снижает стойкость инструмента, повышают пластические деформации.

Охлаждающая жидкость, соприкасаясь с горячей стружкой, с нагретым инструментом и обрабатываемой деталью, поглощает и отводит часть тепла из зоны резания.

Одна из проблем, стоящих сегодня перед обрабатывающей промышленностью, заключается в том, как сократить использование смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Использование СОЖ в механической обработке значительно улучшили производительность и качество обрабатываемых деталей.

Тем не менее, применение СОЖ ввиду доказанной токсичности и неудовлетворительных санитарно-гигиенических условий, влияет на здоровье человека и окружающую среду, так же данный способ охлаждения значительно сказывается на стоимости производства. Эти проблемы побудили многих исследователей искать альтернативные методы охлаждения, заменяя чрезмерное использование смазочно-охлаждающие жидкости.

Переход к обработке без охлаждения (сухое резание) обеспечивает положительный экологический эффект и некоторую экономию за счет исключения необходимости в закупке и утилизации значительных объемов воднодисперсных и масляных смазывающе-охлаждающих технологических жидкостей. Но при этом снижается производительность и повышаются расходы на инструмент.

В связи с этим активно разрабатываются новые альтернативные технологии охлаждения при резании, позволяющие вести обработку более

эффективно, чем всухую, но при этом не оказывающие значительного воздействия на окружающую среду. К ним относятся охлаждение с минимальным количеством жидкости, распыленном в воздушном потоке, использование твердых смазок, криогенное охлаждение и др.

Одна из рассматриваемых альтернатив – применение технологии сухого электростатического охлаждения (СЭО). Электростатическая охлаждающая технология использует ионизированные частицы или воздушный поток для смазки и охлаждения среды.

Данный метод оказывает положительное воздействие на окружающую среду и может способствовать решению следующих вопросов здравоохранения, безопасности и стоимости производства.

На основании изложенного тема работы «Исследование технологии сухого электростатического охлаждения при лезвийной обработке» является актуальной.

Цель работы.

Повышение эффективности токарной обработки заготовок с помощью применения технологии сухого электростатического охлаждения.

Для достижения цели в работе решены следующие задачи:

1. Проведен обзор и анализ современного уровня исследований в области сухого электростатического охлаждения.
2. Разработаны рекомендации к геометрическим параметрам сопла установки СЭО на основе результатов газодинамического моделирования.
3. Экспериментально исследовано влияние СЭО на показатели процесса резания при точении.

1 Применение технологии сухого электростатического охлаждения при механической обработке для повышения эффективности

1.1 Применение сухого электростатического охлаждения

В современном мире ценится качество обработанной детали. В связи с экономическими сложностями и высокой конкуренцией, предприятия стараются минимизировать затраты на поддержание механизмов в идеальном состоянии. Поэтому, чем качественнее деталь, тем точнее она выполняет свое функциональное назначение, обеспечивает налаженную работу оборудования и гарантирует, что производство не столкнется с вопросами необоснованного простоя, из-за выхода детали из строя.

Одним из важных факторов по качеству детали является способ охлаждения зоны резания заготовки, так как он сказывается не только на процессе, но и на зоне обслуживания резания.

Использование смазочных материалов известно с древних времен. На смену многовековым органическим маслам, в основном растительным, в конце XIX в. пришли минеральные (нефтяные) масла. По мере развития науки и техники улучшались нефтяные масла; затем появились синтетические смазочные материалы, твердые, а также, самосмазывающиеся материалы.

В процессе обработки металла смазочно-охлаждающая жидкость используется для снижения воздействия тепла и трения, как на инструмент, так и на заготовку. СОЖ используется для уменьшения силы и температуры резания, предотвращения образования заусенцев, продления срока службы инструмента, улучшения качества поверхности и удаления стружки из зоны резания. К сожалению, в обычных смазочно-охлаждающих жидкостях присутствуют вредные химические составы, которые вызывают проблемы окружающей среды и здоровья человека. Поэтому, в результате воздействия факторов риска обусловленных трудовой деятельностью у работников могут

развиваться профессиональные заболевания, из-за вредных веществ, входящих в состав СОЖ.

В машиностроении, имеется широкое распространение производственных загрязнений при механической обработке, которое в основном возникает из-за отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей. При работе, в СОЖ попадают различные примеси, такие как мелкие отходы, иные масла, местная микрофлора, а так же прочие жидкости. Из-за загрязнения СОЖ не может отвечать заданным функциям, которые на нее возлагаются, поэтому данные жидкости требуют утилизации и замену старых масел непосредственно на новые. С другой стороны, утилизация смазочно-охлаждающих жидкостей стала важной экологической и экономической проблемой, так как она ухудшает состояние почвы, воздуха и воды. Этот вопрос в срочном порядке нужно решать, поскольку затраты на утилизацию дорогостоящие и увеличивают производственные затраты. Производственные затраты – это использование производственных ресурсов. Сумма таких затрат составляет производственную себестоимость продукции работ и услуг. Производственные затраты содержат в себе: прямые материальные затраты; прямые расходы по оплате труда с отчислениями на общественные нужды; утечки от брака; производственные накладные расходы.

В 21-м веке технология обработки должна быть чистой, экологичной, с низкими затратами энергии. Сухое резание или экологически чистые технологии механической обработки без применения каких-либо смазочно-охлаждающих жидкостей, в последние десятилетия становятся все более популярными, так как заботятся о безопасности окружающей среды и здоровья человека. Но так же, с обработкой без применения СОЖ есть некоторые проблемы в процессе обработки металла, одной из которых является высокая температура в зоне резания, которая отрицательно сказывается на сроке службы инструмента, особенно в случае сухого резания труднообрабатываемых материалов. Таким образом, новая технология

резания, которая отличается экологичностью, экономичностью и превосходными параметрами охлаждения и смазки, стала основной при обработке металлов.

Вместе с тем в последние годы появились некоторые новые технологии резания безопасные для окружающей среды, такие как:

- минимальное количество смазки,
- распылительное охлаждение,
- криогенное охлаждение,
- применение различных газов,
- водяной пар и так далее.

Все они положительно влияют на процесс обработки, могут снизить силу и температуру резания, уменьшить износ инструмента и повысить эффективность производства.

Система минимального количества смазки обеспечивает равномерный поток сжатого воздуха и небольшое количество смазочно-охлаждающей жидкости на режущий инструмент или метчик, что охлаждает поверхность, удаляет стружку и обеспечивает наличие смазки. Это продлевает срок службы инструмента, улучшает шероховатость поверхности и в некоторых случаях устраняет необходимость в подаче охлаждающей жидкости во время операций фрезерования.

Технология распылительного охлаждения аналогична технологии распылительной сушки. В процессе распыления охлаждающий раствор распыляется и охлаждается в потоке воздуха. В зависимости от необходимого размера частиц распыление выполняется в ротационном распылителе, форсунке высокого давления или фонтанной форсунке. Охлаждающая среда - холодный воздух, поступающий напрямую снаружи или через воздухоохладитель замкнутого цикла - распределяется через специально сконструированный воздухораспределитель, расположенный на входе камеры распылительного охлаждения.

Криогенные технологии охлаждения наиболее широко используются на производстве авиационной продукции. Криогенное охлаждение и замораживание - быстрые процессы охлаждения и заморозки, которые часто используются в разных отраслях, связанных с питанием, таких как хлебобулочные изделия, кондитерские изделия, мясо и морепродукты. При криогенном охлаждении и замораживании часто используют углекислый газ.

Водяной пар широко применяется в качестве теплоносителя в технологических процессах направления промышленности таких как:

- энергетика,
- машиностроение,
- химическая технология и т.д.

С технической и экономической точки зрения широко распространен водяной пар. По отношению к парам других веществ обладает относительно низкой стоимостью воды и отсутствием вредного воздействия на металлы и живые организмы. Вещество свободно разделяется на газ и пар. Паром можно назвать настоящий газ, который способен в условиях своего использования переходить в жидкость.

Так же общеизвестно, что любое вещество в зависимости от внешних условий, определяемых давлением и температурой, может находиться в различных агрегатных состояниях, или фазах. Таких фаз известно три: газообразная, жидкая и твёрдая.

Фазовые переходы значительно изменяют свойства вещества, в частности их плотности, как основные физические характеристики.

Сухое электростатическое охлаждение (СЭО) в механической обработке это одна из новых технологий, которая является дешевой, экологически чистой и не требует восстановления.

Применение СЭО в механической обработке позволяет избежать негативного воздействия обычных смазочно-охлаждающих жидкостей на окружающую среду и здоровье человека. СЭО позволяет полноценно использовать природные ресурсы в долгосрочной перспективе, снижать

социальные риски, такие как организация сотрудничества, с заинтересованными сторонами, снижение экологических рисков и устранения неприемлемых последствий для общества, что позволяет достигать поставленных целей в нашей работе.

Метод СЭО заключается в том, что воздух насыщенный ионами путем ионизации, подается в зону резания. Ионизация происходит, когда воздух проходит между отверстием сопла и высоковольтным электродом. Происходит управление электрическим разрядом и последующее воздействие активированного воздуха на процессы физико-химических контактов, происходящие на границе раздела между режущим инструментом и обрабатываемым материалом.

В качестве технологической среды (ТС) выбор воздуха обусловлен своей низкой стоимостью и доступностью, так как он является экономичным ресурсом. Воздух подается к станку через специальную созданную сеть, которая в свою очередь берется из атмосферы и сжимается с помощью компрессора.

Эффективность метода заключается в том, что увеличивает возможность выносить мельчайшие частицы продуктов резания из зоны резания, что обеспечивает контроль над состоянием инструмента и поверхностью детали в зоне резания.

Ионизаторы делятся на два типа, в соответствии от того, какие типы ионов они способны генерировать: униполярные ионизаторы – производят только отрицательно заряженные ионы и биполярные ионизаторы – производят как отрицательные, так и положительные ионы.

Главным отличием СЭО является сильное электрическое поле и направленное движение униполярно заряженных частиц. Это вызывает выход электронов или наоборот, приток с поверхности металла.

Поверхностный слой металла насыщается электронами при положительном коронном заряде, но при отрицательном заряде – наоборот. В экспериментальных работах иных исследователей, были получены данные,

что, при изменении режима работы установки СЭО, появляется возможность контролировать элементарным и фазовым составом поверхностного слоя режущего инструмента.

В итоге это приводит к увеличению долговечности режущего инструмента. Схема коронного разряда показана на рисунке 1.

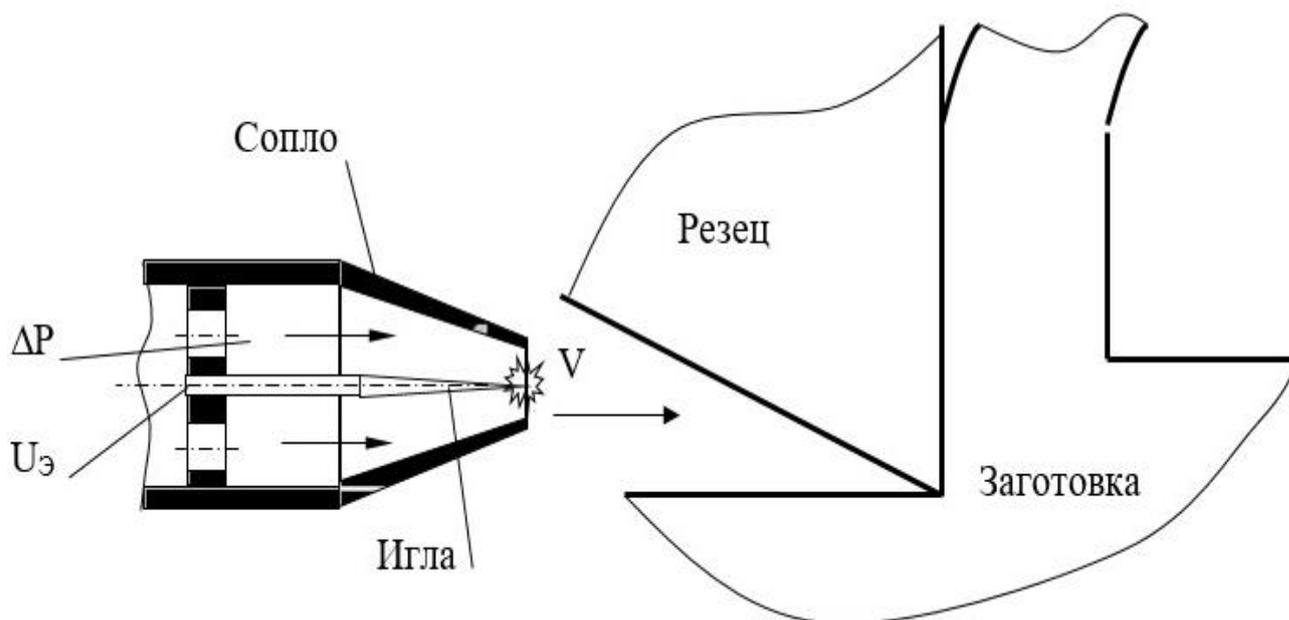


Рисунок 1 – Коронный разряд сопла

Когда при обработке коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов используется СОЖ, это приводит к тому, что на поверхности образуются сгоревшие твердые частицы.

При данной обработке ухудшается качество обрабатываемой поверхности детали, так как нуждается в дополнительной обработке. Из-за появления в работе с упомянутыми материалами данной проблемы, было принято решение использовать систему СЭО.

1.2 Принципы технологии сухого электростатического охлаждения

Значительные возможности для повышения эффективности токарной обработки труднообрабатываемых материалов связаны, прежде всего, с применением новых смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Современные разработки в области повышения технологической эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) свидетельствуют о целесообразности термической, ультразвуковой, световой и электрической активации СОЖ с целью повышения их проникающей способности. При разработке одного из указанных направлений (электрической активации СОТС) был предложен метод «сухого» электростатического охлаждения (СЭО), основанный на подаче воздушного потока, обработанного электрическим разрядом с униполярной короной, вместо охлаждающей жидкости в зона резания. Технология СЭО была успешно испытана и внедрена на ряде российских и зарубежных предприятий при токарной обработке и фрезеровке заготовок из труднообрабатываемых материалов, например, при обработке заготовок из стали У1, сплавов ВТ2 и ЭП7 0 8. Исследования эффективности СЭО при обработке заготовок с помощью НИП до настоящего времени практически не проводились, хотя вероятность его эффективного применения достаточно высока.

Так же были определены основные физические механизмы, определяющие эффективность СЭО:

- Охлаждающий эффект СЭО, обусловлен благодаря наличию заряженных частиц,
- Смазывающий эффект СЭО демонстрируется в более интенсивном образовании граничной пленки, обусловленной присутствием озона и ионов,
- Пассивация ювенильной поверхности, происходящая гораздо быстрее, по причине достаточно высокой концентрации озона,

заряженных частиц различного состава, кислорода и лучшему проникновению воздушного потока.

Из этого следует, что воздействие СЭО переплетается с целым комплексом разнообразных физических механизмов, инициируемых потоком озонированного и ионизированного воздуха в совокупности с температурами и напряжениями, имеющимися в зоне резания.

Метод данной системы заключается в том, что через электростатический заряд генерируется очень тонкий жидкий аэрозоль смазки на режущий инструмент. Смазочная жидкость, используемая в электростатической системе охлаждения может быть в твердом, жидком или газовом состоянии.

Твёрдые технологические смазки — смазочные материалы, используемые для обработки металлов. Они применяются на операциях точения, сверления, зенкерования, резбонарезания, развёртывания, шлифования материалов с хорошей обрабатываемостью и труднообрабатываемых материалов, таких как медные и алюминиевые сплавы, нержавеющая сталь, титан, титановые сплавы.

Пластические деформации и трение, возникающие во время резания, создают высокие давление и температуры в зоне контакта режущего инструмента и заготовки. К твердым технологическим смазкам относятся специальные противоизносные модификаторы, присадки и наполнители, снижающие трение и температуру в зоне резания, что позволяет в несколько раз увеличить срок службы инструмента и улучшить качество обрабатываемой поверхности. Использование твердых технологических смазок в десять раз экономичнее традиционных смазок благодаря оптимальной концентрации минимального количества смазки в определенном месте.

При твердой смазке частицы должны быть преобразованы в раствор. В электрораспылителе данный раствор преобразуется в капли.

Он проходит через сопло, а затем электрически заряжается до очень высокого напряжения. Заряженная жидкость в сопле становится нестабильной, поскольку она вынуждена удерживать большое количество зарядов. Когда жидкость достигает критической точки, в которой она больше не может удерживать электрический заряд, с кончика сопла он разлетается в облако крошечных, сильно заряженных частиц, как схематично показано на рисунке 2.

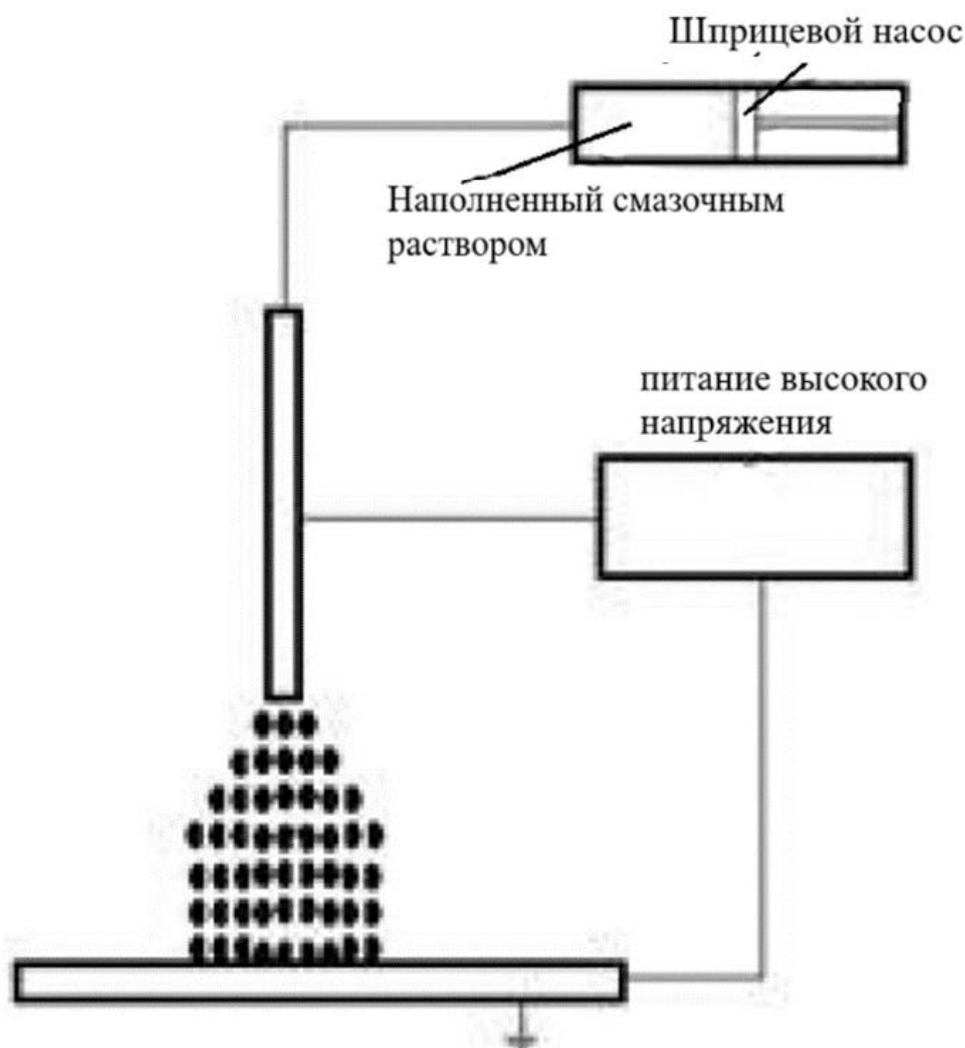


Рисунок 2 –Облако заряженных частиц

Для сверления AISI 4340 был разработан данный тип системы электростатической смазки рисунок 3. Отрицательно заряженный смазочный

раствор притягивается к нейтральному, заземленному предмету, который является режущим инструментом. Шлейф капель генерируется электрическим зарядом жидкости при высоком напряжении в облако заряженных капель, а затем отправляются в зону резания через сопло.



Рисунок 3 – Экспериментальная установка для твердой электростатической смазки

Для газообразного теплоносителя коронный разряд используется в качестве создания ионизированного воздушного потока. Молекулы газа вблизи области коронного разряда, становятся ионизированными при воздействии электрического поля высокой интенсивности между коронирующим электродом с высоким наконечником и коллектором с низким наконечником электрод (то есть режущий инструмент). Молекулы ионизированного газа движутся в направлении коллектора электрода, сталкиваясь с нейтральными молекулами воздуха. Во время этих столкновений импульс передается от ионизированного газа нейтральным

молекулам воздуха, в результате чего газ движется по направлению к коллекторному электроду, как показано на рисунке 4.

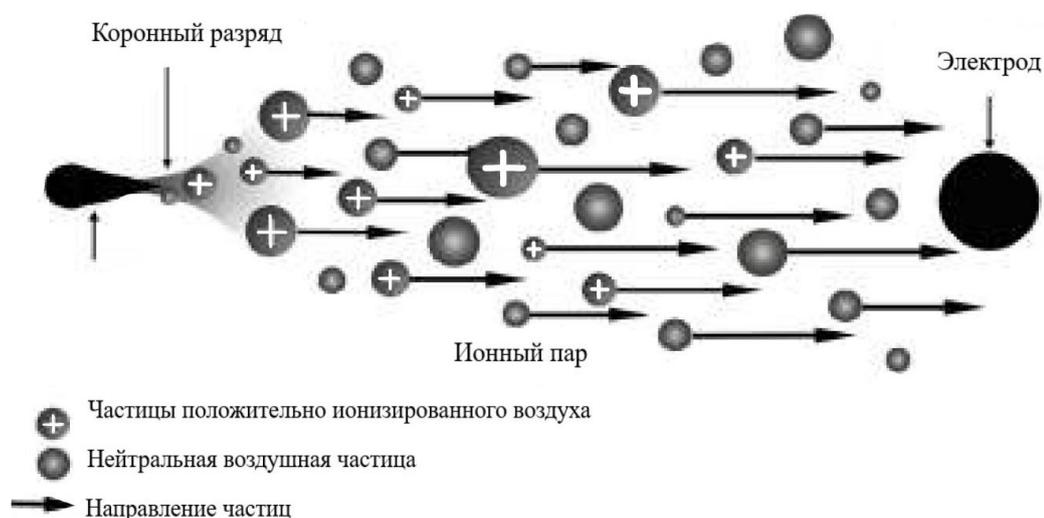
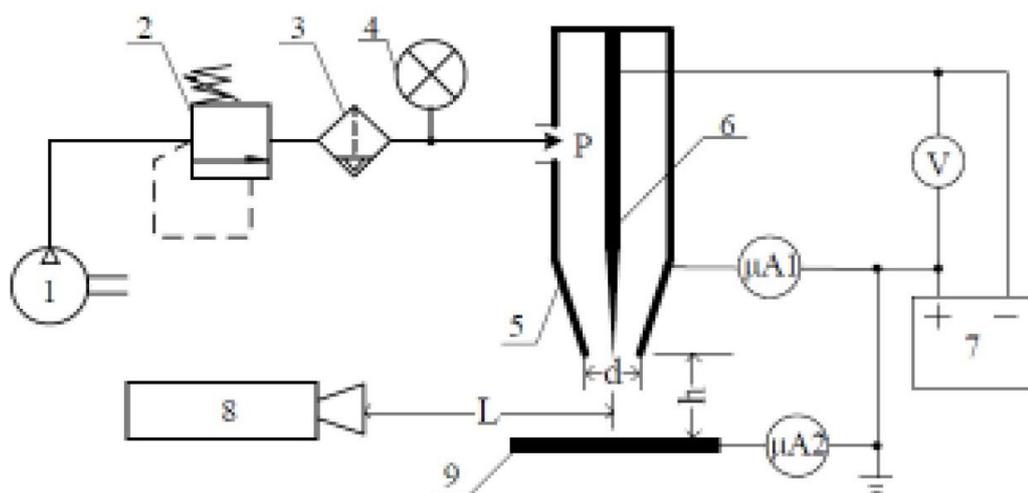


Рисунок 4 – Облако мелких, сильно заряженных частиц

На рисунке 5 схематически показана схема экспериментальной установки



- | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Воздушный компрессор | 6. Игла |
| 2. Редукционный клапан | 7. Высоковольтный источник питания |
| 3. Водоразделительный газовый фильтр | 8. Чистый воздух |
| 4. Барометр | 9. Медная тарелка |
| 5. Сопло | |

Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки СЭО

Сжатый воздух состоял из заряженных ионов и озона молекулы. Воздух, обработанный коронным разрядом, содержит большое количество активного вида (O, O₃, H⁺, O⁻, HO⁻ и т. д.). Эти активные виды текут к зоне резания с высокой температурой и уменьшением поверхностной энергии заготовки. Они тогда поглощаются поверхностью трения между инструментами и деталями и в сочетании с его химической связью образуют некоторые граничные пленки, которые могут играть роль смазки. Существующие в ионизированном воздухе озон, кислород и виды активных заряженных частиц обладают сильной окисляемостью. Это и поток более сильного воздуха делают скорость пассивации поверхности выше, чем у обычной смазочно-охлаждающей жидкости.

1.3 Влияние электростатического охлаждения на износ инструмента

При резании металлов, механизм износа инструмента сложен и состоит из адгезионного, абразивного, диффузионного и химического износа. Удельное влияние любого из них зависит от свойств детали, материала, инструмента, условий обработки и в первую очередь от скорости резания.

Износ – это процесс разрушения и отделения материала от поверхности твердого тела и накопления его остаточной деформации при трении, что проявляется в постепенном изменении размеров и формы тела.

При токарной обработке инструментальной стали было достигнуто улучшение срока службы инструмента в 1,5-3,3 раза при использовании сухой электростатической системы охлаждения по сравнению с процессом сухой обработки рисунок 6.

Рассматривая данный рисунок, видно, какая обработка лучше, сухая обработка или электростатическая, с точки зрения срока службы инструмента.

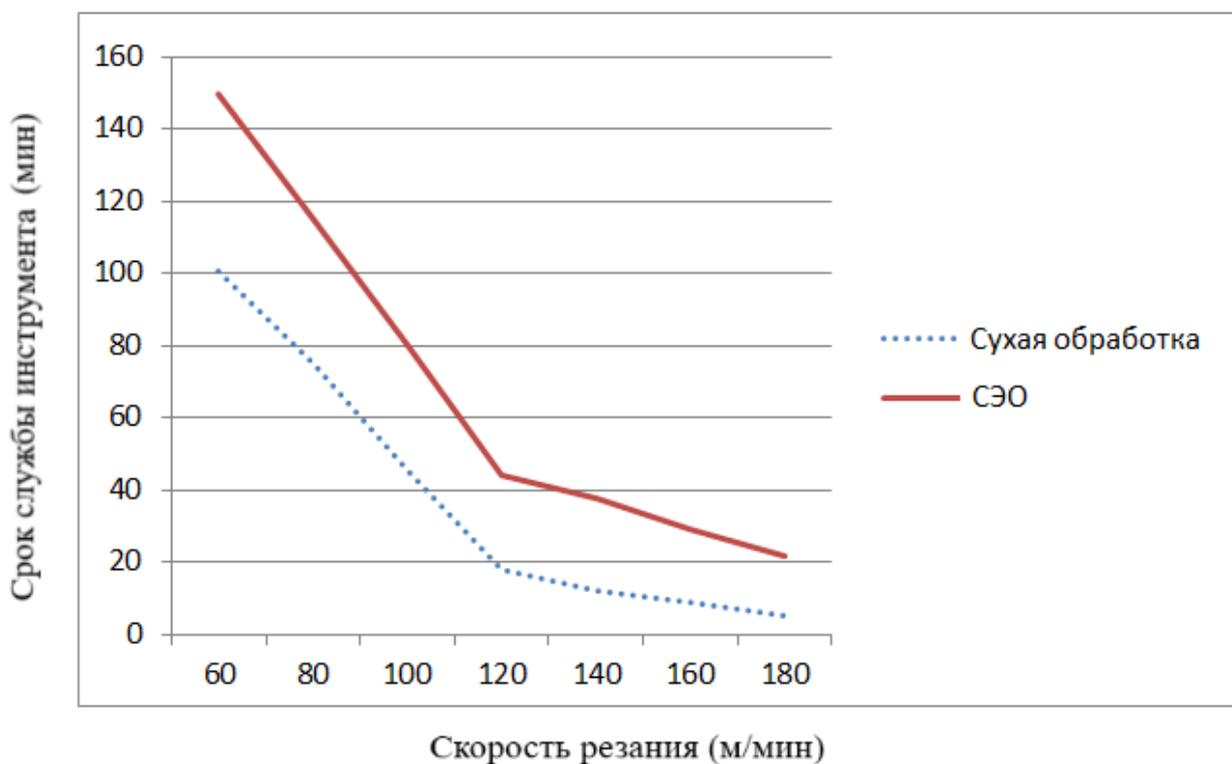


Рисунок 6 – Влияние скорости резания на срок службы инструмента

В исследовании зарубежных ученых S. Sharif, D. Kurniawan [3] приведены данные по испытаниям СЭО при обработке стали AISI 4340, где срок службы инструмента был увеличен на 66% рисунки 7, 8, 9.

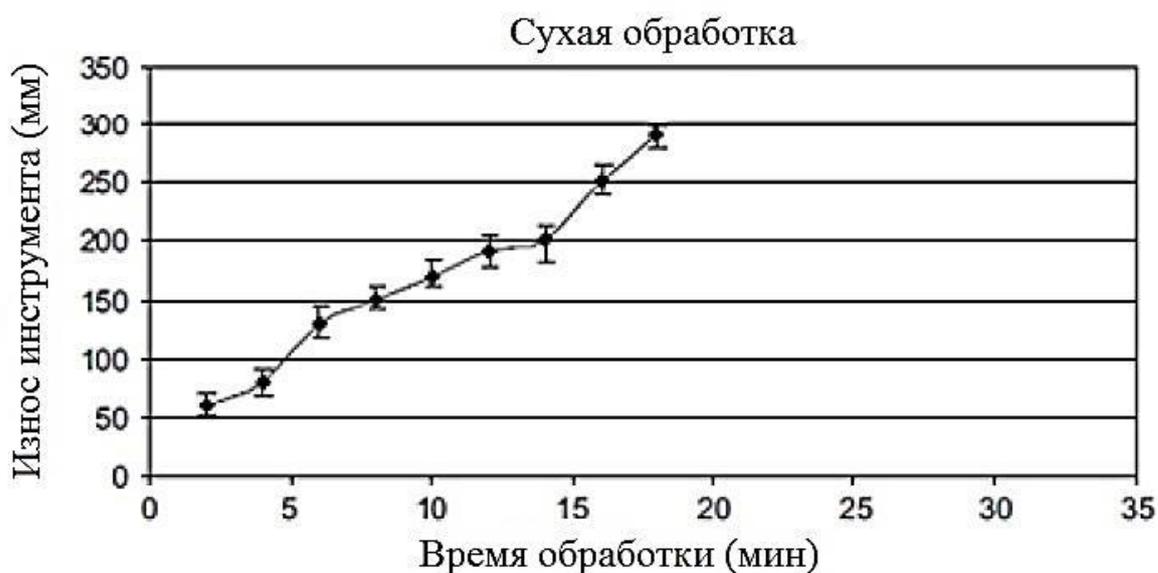


Рисунок 7 – Износ инструмента при сухой обработке

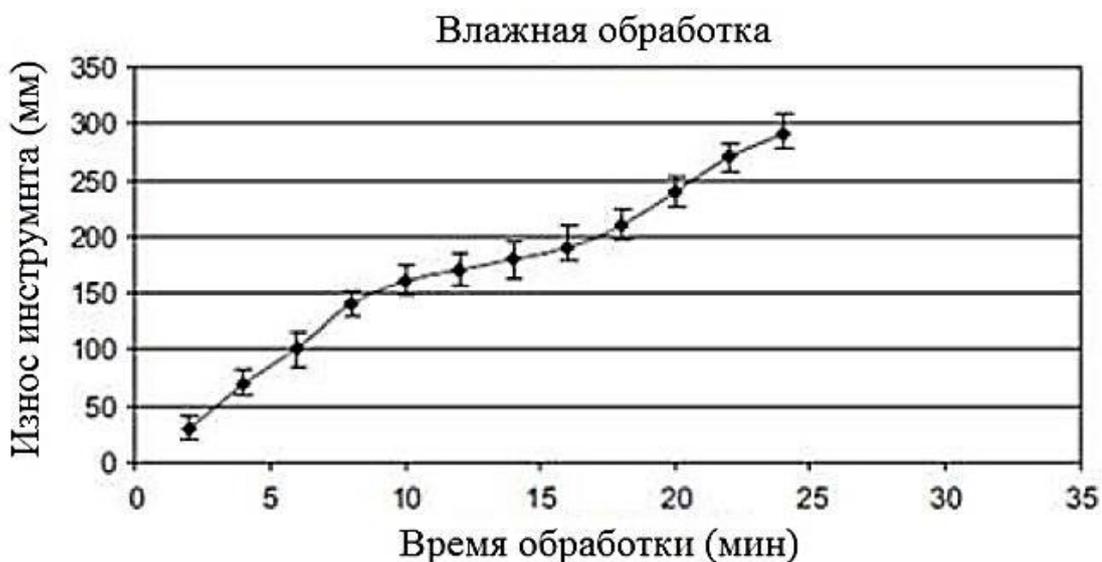


Рисунок 8 – Износ инструмента при влажной обработке

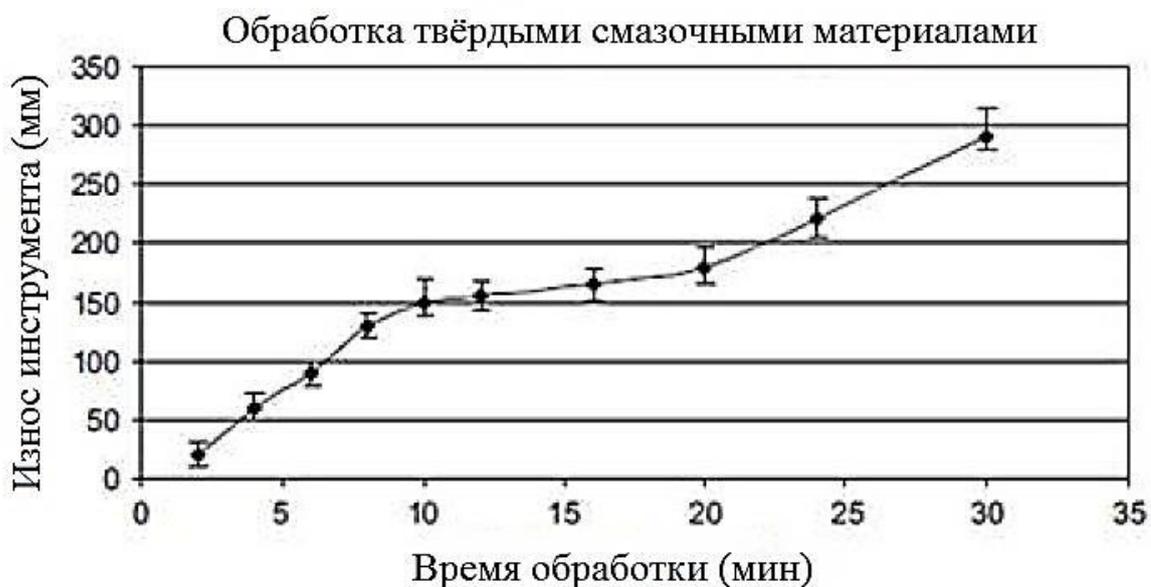


Рисунок 9 – Износ инструмента при обработке СЭО

Так же, в исследовании зарубежных ученых S. Sharif, D. Kurniawan [3] было применено сухое электростатическое охлаждение при обработке титанового сплава Ti6Al4V, в котором было обнаружено, что при скорости резания 120 м / мин износ инструмента снизился почти на 30% по сравнению

с сухим резанием рисунки 10, 11. Лучшие результаты в сроке службы инструмента достигаются при уменьшении скорости резания.

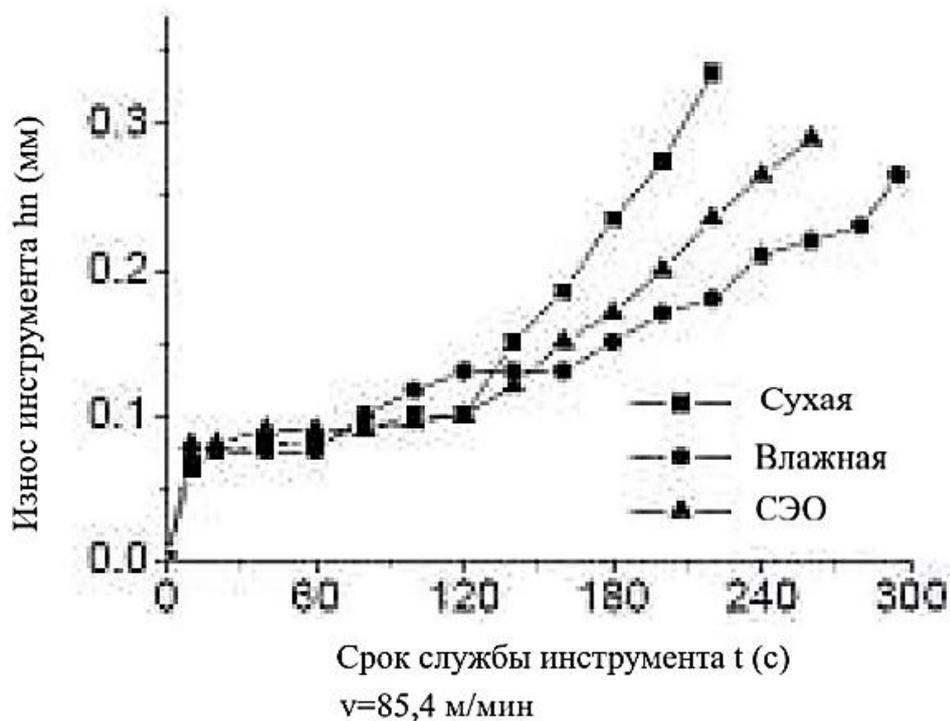


Рисунок 10 – Боковой износ при скорости резания равной 85,4 м/мин

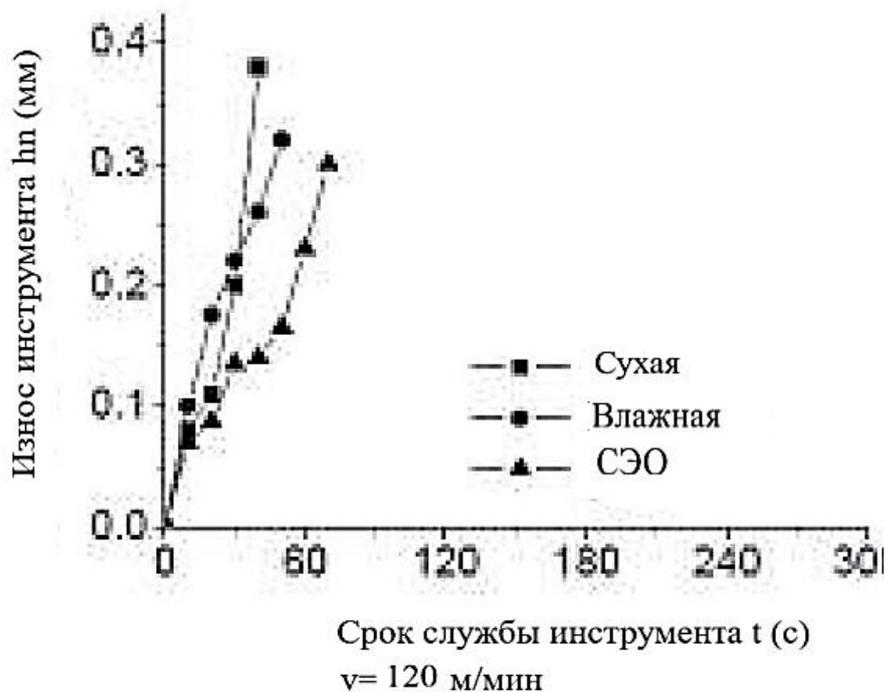


Рисунок 11 – Боковой износ при скорости резания равной 120 м/мин

Они показали, что техника электростатического охлаждения способна уменьшить износ, скорость и увеличение срока службы инструмента при использовании для обработки сталей и титановых сплавов. Эмульсия и электростатик сыграли роль охлаждения и смазки. Впрыск ионизированной воздушной струи содержит большое количество ионов и молекулярного озона генерируемый в разряде, озон мог легко проникнуть в поверхность стружки инструмента, и разработаны смазочные пленки из-за сильного окисления. В результате площадь трения была уменьшена; температура резания, и износ инструмента снизились.

1.4 Влияние электростатического охлаждения на силу резания

Сила резания обусловлена многими факторами, первостепенными из которых представляются:

- механические свойства обрабатываемого материала, его прочность, твердость, способность к упрочнению (наклепу),
- глубина резания t ,
- подача s ,
- углы заточки режущей части резца.

Сила резания – результирующая сил сопротивления перемещению, действующих на инструмент.

Наиболее важными параметрами процесса резания являются силы резания. Мощность, необходимая для резки, зависит от их размера. Они влияют на износ инструмента и вибрацию, а, следовательно, и на качество обрабатываемой поверхности. При расчете прочности, силы резания являются исходными данными и жесткостью режущего инструмента, элементов оснастки, узлов деталей металлорежущих станков.

В работе китайский исследователей [47], было изучено электростатическое охлаждение при точении титанового сплава TC11. Посредством испытаний данные об усилии резания и шероховатости

поверхности при механической обработке с использованием обычных и электростатических методов охлаждения были зарегистрированы, как указано в таблице 1. Было обнаружено, что в условиях резания с сухим электростатическим охлаждением сила резания была меньше, а колебания силы резания были меньше, чем при применении обычного охлаждения.

Таблица 1 – Два метода охлаждения

t (мм)	V (м/мин)	S (мм/об)	Электростатическая F (Н)	Обычная F(Н)
0,1000	66,67	0,0722	30,4	37,4
0,1778	88,89	0,1056	56,3	71,3
0,2556	50,00	0,1389	62,8	76,8
0,3333	72,22	0,0500	81,2	111,3
0,4111	94,44	0,0833	130,8	153,8
0,4889	55,56	0,1167	120,0	152,4

Аналогичным образом, было установлено, что при обработке инструментальной стали при сухом электростатическом охлаждении; сила резания была меньше, чем при сухой обработке. Также было установлено, что различия силы резания увеличиваются с увеличением скорости резания рисунках 12, 13.

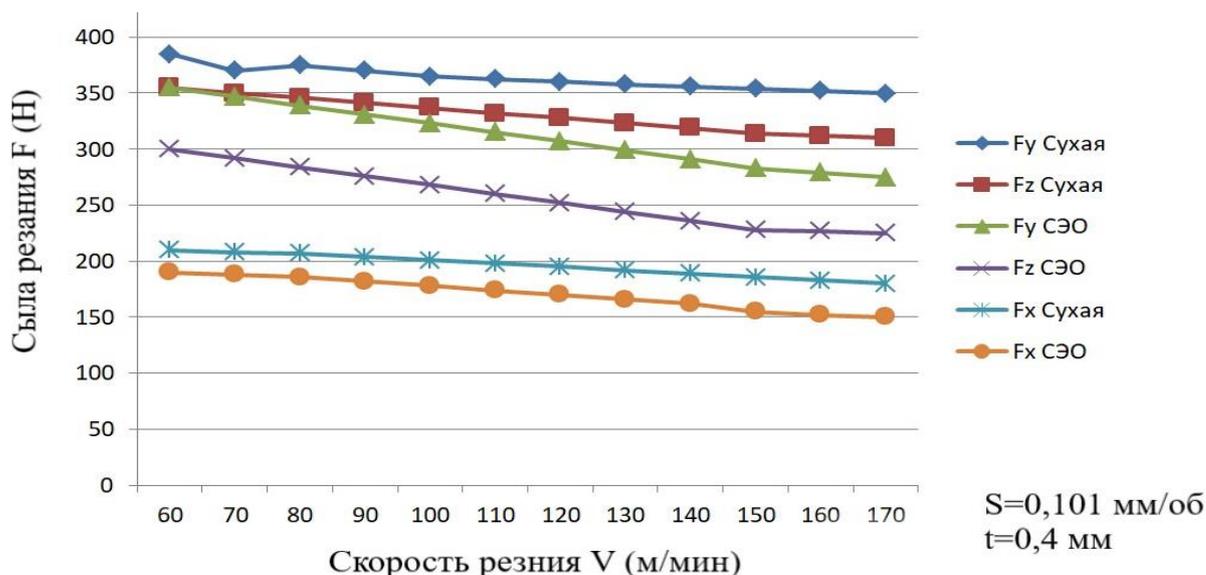


Рисунок 12 – Зависимость силы резания от скорости резания

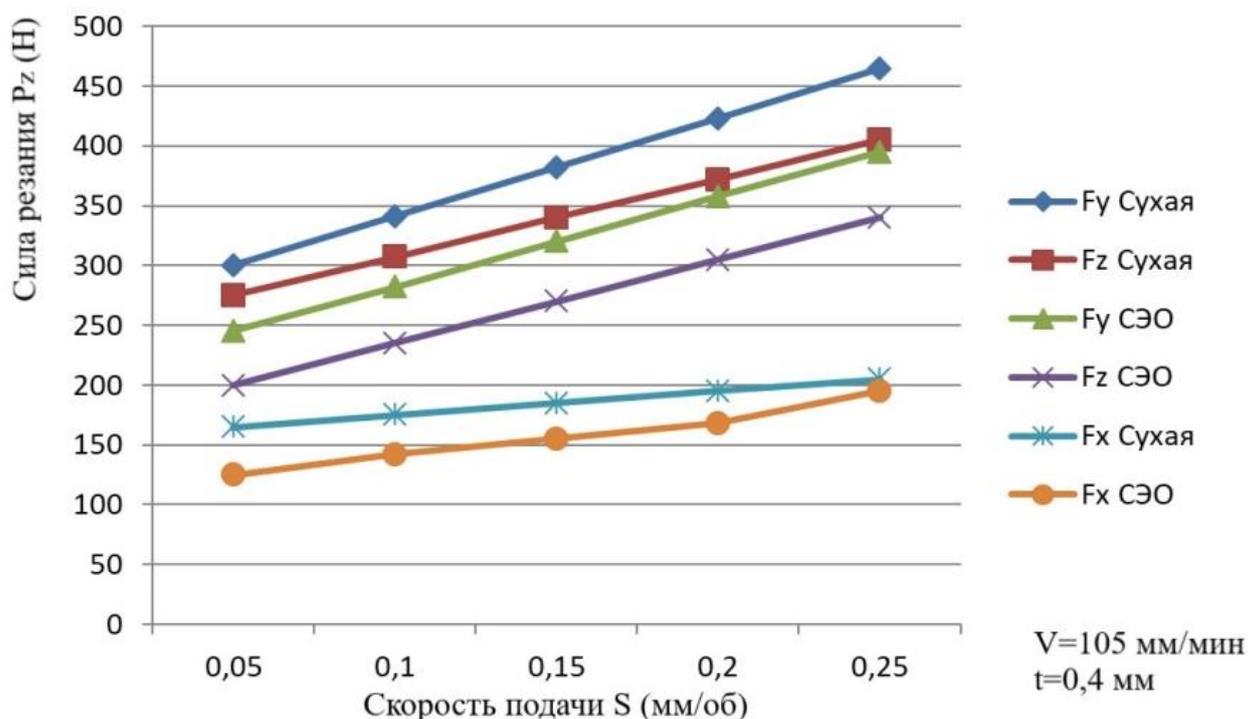


Рисунок 13 – Зависимость силы резания от увеличения подачи

1.5 Влияние электростатического охлаждения на геометрическую точность

Степень близости реальной детали к ее геометрическому прототипу называется геометрическая точность детали. Точность детали зависит от измерения ее погрешности. Погрешностью детали бывает различных видов, таких как отклонение от сносности, не параллельность, не перпендикулярность и другие. Можно сказать, что степень отличия реальной детали от ее геометрического прототипа.

Точность детали можно определить с помощью ряда нескольких показателей. Для того чтобы оценить погрешность геометрической точности, нужно сравнить два показателя: реальный контур детали и контур ее прототипа. Чтобы достичь желаемого результата, необходимо записать измеренный контур реальной детали относительно контура прототипа. Если деталь большая, то это физически сложно обеспечить из-за необходимости

большой площади. Кроме того, при высоких требованиях к точности необходимо будет дополнительно увеличить размер контура, что приведет к еще большим размерам. С расположением контура детали относительно контура прототипа существует много вариантов решения задачи, следовательно, и неоднозначность в оценке погрешности.

В работе [45] было исследовано изменение диаметра отверстия в зависимости от времени при различных обработках, таких как обработка с применением смазочно охлаждающих жидкостей, без охлаждения и при помощи сухого электростатического охлаждения.

При сверлении основной проблемой является то, что тепло, генерируемое в процессе, может привести к тепловому расширению сверла, влияя на размер и качество отверстий. Когда проводилась обработка СЭО, наблюдалось, что стандартное отклонение среднего полученного диаметра ниже, чем при использовании обработки в сухую или с водяными вкраплениями рисунок 14.

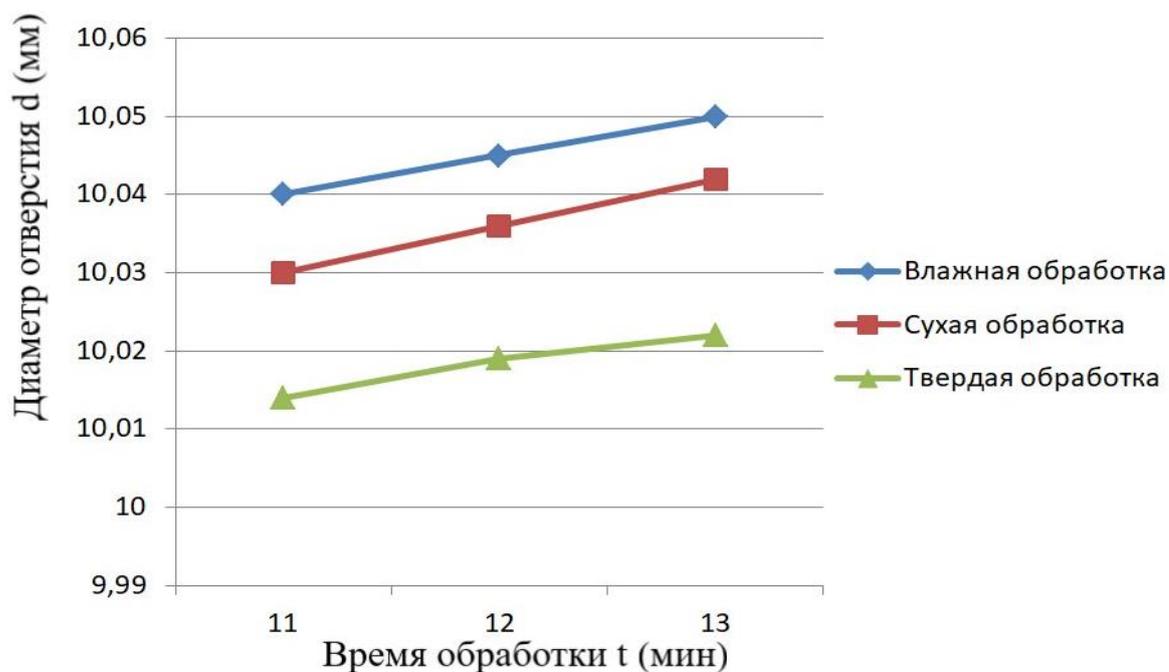


Рисунок 14 – Изменение диаметра отверстия в зависимости от времени при обработке с СОЖ, без охлаждения, обработки СЭО

1.6. Влияние электростатического охлаждения на поверхность

Шероховатость поверхности является широко используемым показателем качества обрабатываемой детали и техническим требованием к механическим деталям. Отчет, сравнивающий электростатическое охлаждение с процессами жидким охлаждением и без охлаждения стали AISI 4340, был проведен в [45], который показал, что шероховатость поверхности была в среднем на 23% и 41% меньше по сравнению с влажной и сухой обработкой. Это явление было связано со смазывающим действием твердого смазочного материала, вызывающим уменьшенные силы трения между инструментом и заготовкой, которые все еще были эффективны даже при высоких температурах во время обработки. На рисунках 15, 16, 17, показано как от времени меняется шероховатость на разных типах обработки.

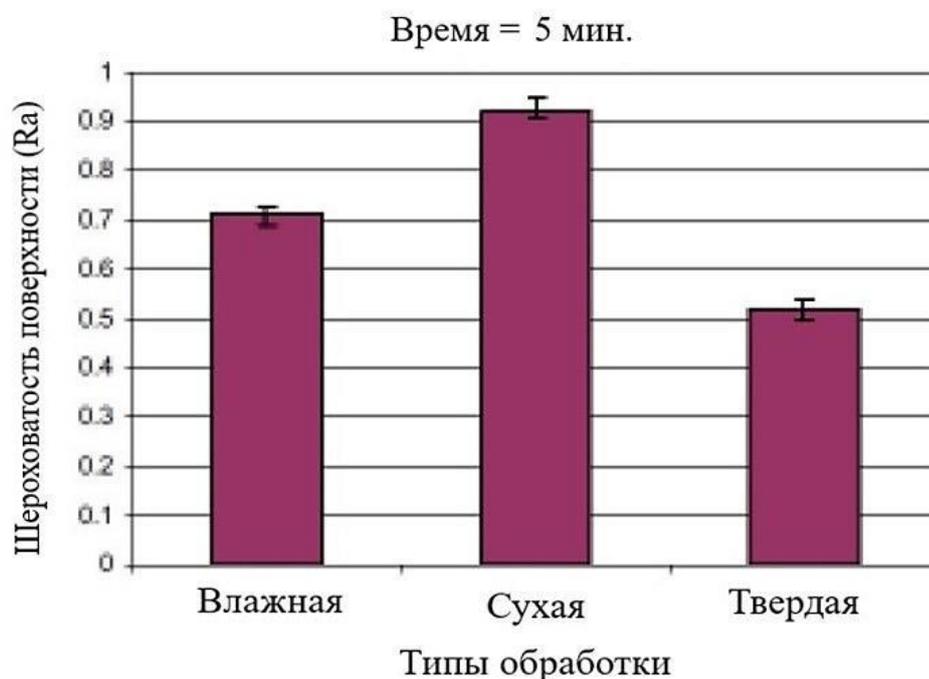


Рисунок 15 – Изменение шероховатости время = 5 мин

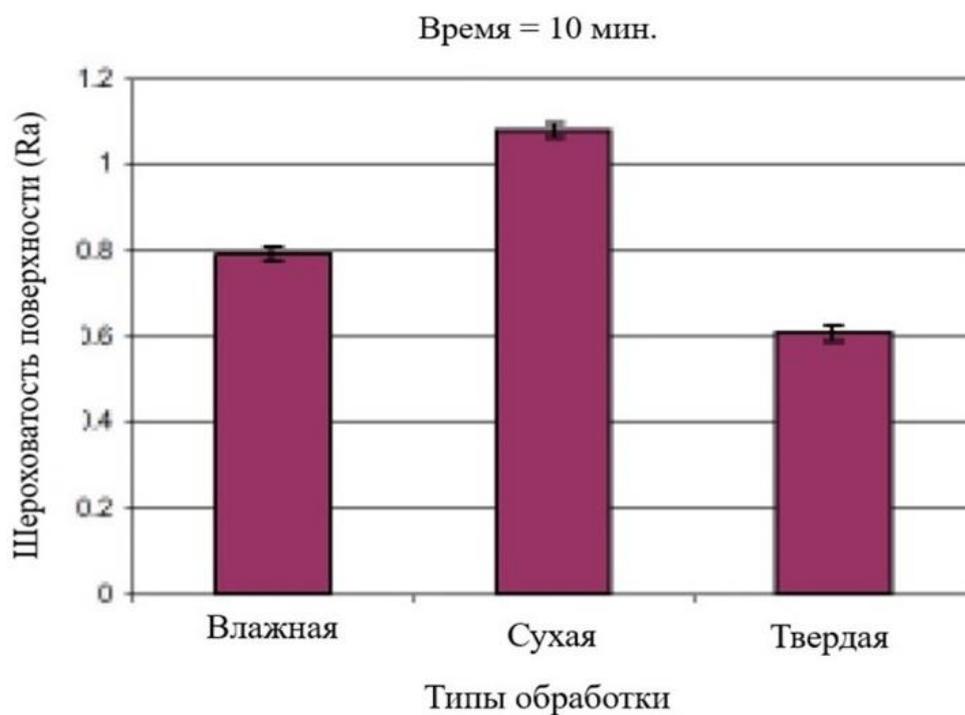


Рисунок 16 – Изменение шероховатости время =10 мин

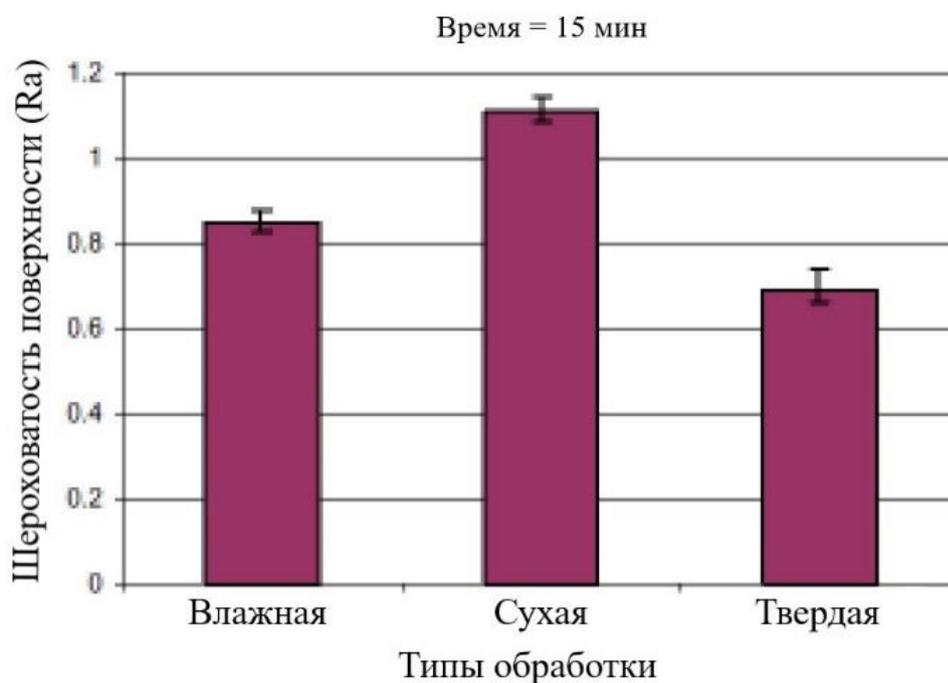


Рисунок 17 – Изменение шероховатости время = 15 мин

Для обработки титанового сплава также сообщалось об электростатической системе охлаждения. Улучшенная обработка

поверхности по сравнению с обычной системой охлаждения (влажная обработка) и результаты представлены в таблице 2. Электростатическое охлаждение проиллюстрировало повышение качество поверхности при обработке инструментальной стали и титанового сплава.

Таблица 2 – Сравнение качества поверхности при обработке СЭО

Глубина резания t (мм)	Скорость резания V (м/мин)	Подача S (мм/об)	Обработка СЭО Ra (мкм)	Обработка без охлаждения Ra(мкм)
0,1000	66,67	0,0722	0,6358	0,7542
0,1778	88,89	0,1056	0,8436	0,9452
0,2556	50,00	0,1389	1,7858	1,6648
0,3333	72,22	0,0500	0,4794	0,7322
0,4111	94,44	0,0833	0,6360	1,6648
0,4889	55,56	0,1167	0,6224	0,8527

Выводы по разделу

В теоретическом разделе рассмотрено применение технологии сухого электростатического охлаждения при механической обработке для повышения эффективности.

По области применения СЭО относится к современным технологиям экологически чистого охлаждения при резании наряду с такими технологиями как охлаждения минимальным количеством смазки, распылительное охлаждение, криогенное охлаждение, применение различных газов, водяной пар. Технология СЭО обеспечивает эффективное резание за счет физических следующих физических механизмов:

- охлаждающий эффект, обусловленный движением заряженных частиц;
- смазывающий эффект состоящий в более интенсивном образовании граничной пленки, обусловленной присутствием озона и ионов;

– пассивация ювенильной поверхности, происходящая гораздо быстрее, по причине достаточно высокой концентрации озона, заряженных частиц различного состава, кислорода и лучшему проникновению воздушного потока.

Влияние электростатического охлаждения на износ инструмента по данным зарубежных исследователей при обработке стали и титана составляет величину порядка 30% по периоду стойкости при обработке сталей и титановых сплавов.

Динамика изменения силы резания при СЭО при изменении скорости, подачи и глубины резания в принципе не отличается от аналогичных показателей для обработки без охлаждения. По абсолютному значению сила резания при СЭО меньше чем в других рассмотренных случаях.

Влияние электростатического охлаждения на шероховатость поверхности состоит в снижении среднеквадратичной высоты микропрофиля R_a по сравнению с жидким охлаждением в среднем на 23% и на 41% по сравнению с резанием без охлаждения.

Многочисленными исследованиями установлена эффективность СЭО с точки зрения стойкости инструмента, силы резания, геометрических параметров обработанной поверхности, таких как точность и шероховатость. Установлено, что СЭО представляет собой экологически безопасный метод охлаждения и превосходит сухую обработку и обработку с жидким охлаждением.

Вопрос по исследованию влияния геометрии сопла, воздуха подающего сопла установки СЭО на качество процесса сухого электростатического охлаждения в научной литературе не освещен. На основании сказанного, выведено в качестве задачи решаемой на следующем разделе нашей работы.

2 Газодинамическое моделирование сопла установки сухого электростатического охлаждения

2.1 Постановка задачи

Как показано в теоретическом разделе, принцип воздействия технологии СЭО на процесс резания состоит главным образом в разупрочнении обрабатываемого материала и в образовании смазывающих окисных пленок на контактных поверхностях. Оба этих механизма определяются наличием в зоне резания модифицированной коронным разрядом воздушной среды. Следовательно, чем выше степень модификации воздушной среды в зоне резания, тем эффективнее СЭО.

Коронный разряд, возникающий в воздушном потоке между иглой и заземленным соплом определяется разностью потенциалов (напряжением, подаваемым на иглу). С ростом напряжения заряд сначала возникает, затем имеется область устойчивой короны, а при дальнейшем росте напряжения коронный разряд переходит пробой – переход коронного разряда в искровой. Очевидно, что пред пробойное напряжение $U_{пр}$, соответствующее устойчивой короне, обеспечивает наибольшую степень модификации воздуха. Поскольку разряд происходит в подвижной воздушной среде, то увеличить $U_{пр}$ возможно за счет повышения скорости истечения воздуха – повысив давление в сопле. Пределом в данном случае является стандартное давление в промышленных сетях сжатого воздуха 4 атм. Также излишне высокая скорость истечения может быть неприемлема из соображений раздувания стружки при резании, что нарушает правила техники безопасности.

Другим путем повышения $U_{пр}$ является изменение геометрических характеристик среды коронного разряда, в частности, величину смещения иглы относительно среза сопла (в данном случае – относительно минимального диаметра закругленной кромки сопла).

В качестве критерия выступает интегральная скорость потока, измеренная по пути l от конца иглы до ближайшей точки сопла. Дискрета измерения пути dx зависит от сетки, принятой при численном расчете.

Рассмотрим газодинамические модули ANSYS.

Программное обеспечение Fluent содержит широкие физические возможности моделирования, необходимые для моделирования потока, турбулентности, теплопередачи и реакций для промышленного применения. Они варьируются от потока воздуха над крылом самолета до сгорания в печи, от пузырьковых колонн до нефтяных платформ, от потока крови до производства полупроводников и от проектирования чистых помещений до станций очистки сточных вод. Флюент охватывает широкий диапазон, включая специальные модели, с возможностью моделирования внутрицилиндрового сгорания, аэроакустики, турбомашинного оборудования и многофазных систем.

Компания Fluent также предлагает высокомасштабируемые, высокопроизводительные вычисления (HPC), которые помогают быстро и экономично решать сложные, крупномасштабные задачи по моделированию в области вычислительной гидродинамики (CFD). Компания Fluent установила мировой рекорд в области супервычислений, масштабируя до 172 000 ядер.

Рабочие процессы, основанные на выполнении задач, ускоряют процесс от CAD до сеток, готовых к CFD.

Благодаря Fluent, начинающие и опытные пользователи могут проводить симуляцию жидкостей за меньшее время и с меньшим количеством попыток, чем когда-либо прежде. Простые в использовании рабочие процессы сцепления на основе задач и технология Mosaic в сочетании с проверенным решающим устройством Fluent обеспечивают превосходные результаты.

Fluent предоставляет полное решение в рамках системы, работающей по принципу "одного окна". Fluent оптимизирует рабочий процесс для

создания сетки из импортированных САПР, что устраняет барьеры для решения масштабных задач.

Рабочий процесс, основанный на задачах, обеспечивает организованный процесс моделирования и предлагая наиболее точные результаты за меньшее время. На каждом этапе процесса программное обеспечение предоставляет наиболее подходящие варианты проектирования или настройки по умолчанию.

Сложные модели, на которые раньше уходили дни или даже недели, с использованием Fluent могут быть реализованы за несколько часов с минимальным ущербом для точности моделирования.

ANSYS Chemkin-Pro это программное обеспечение для моделирования и прогнозирования химических эффектов

Моделирование и прогнозирование влияния химии в системе является ключом к разработке конкурентоспособной продукции в области транспорта, энергетики и переработки материалов. Поскольку разработчики газовых турбин, котлов и поршневых двигателей стремятся соответствовать требованиям к низкому уровню выбросов с постоянно растущими требованиями к топливной гибкости, они также должны поддерживать или даже улучшать эксплуатационные характеристики своей системы. Аналогичным образом, проектирование высокопроизводительных материалов и химических процессов с высоким выходом и качеством должно осуществляться с минимальным количеством побочных продуктов или отходов. Опираясь только на тестирование для точной проверки эксплуатационных характеристик, недопустимо, учитывая современные сложные конструкции и укороченные циклы проектирования. Эффективное имитационное моделирование базового детального химического состава часто имеет решающее значение для экономически эффективного проектирования систем с уменьшенными выбросами загрязняющих веществ или нежелательных побочных продуктов.

Чтобы помочь получить ключ к пониманию кинетических зависимостей, Chemkin-Pro включает в себя анализатор путей реакции. Используя интерактивный визуальный дисплей, анализатор путей реакции обеспечивает четкое представление о доминирующих путях реакции, облегчая разработку и сокращение механизмов.

Chemkin-Pro позволяет использовать сети реакторов для моделирования сложных полей.

Эквивалентные реакторные сети (ERN) позволяют моделировать реальные сжигатели, горелки и химические реакторы, позволяя наиболее эффективно предсказывать выбросы с помощью детального химического анализа.

Chemkin-Pro обеспечивает моделирование стабильности горения при низких выбросах.

Модель экстинкции Chemkin-Pro позволяет быстро и точно рассчитать скорость деформации экстинкции, используемую для определения стабильности системы сгорания. Это важно в системах с низким содержанием NOx.

Chemkin-Pro позволяет понять и предсказать образование частиц

Инновационная функция отслеживания частиц Chemkin-Pro позволяет отслеживать зарождение, рост, агрегацию и окисление частиц. Два отдельных подхода к отслеживанию позволяют предсказать средний размер и плотность частиц и/или получить подробную информацию о гранулометрическом распределении частиц, которая может быть использована для прогнозирования выбросов сажи или для оптимизации производства частиц.

В Chemkin-Pro легко создавать CFD пламенные таблицы со настраиваемой скоростью и точностью.

Chemkin-Pro позволяет изучить, как входные неопределенности влияют на результаты моделирования

Повысить надежность результатов моделирования благодаря возможности вычисления полос ошибок на основе заданных пользователем диапазонов входной точности.

Лучше оценить и оптимизировать силовые агрегаты с точки зрения топливного эффекта, эффективности, ударопрочности и выбросов.

Понимание и прогнозирование влияния химического состава в системе являются ключом к разработке конкурентоспособных продуктов в области транспорта, энергетики и обработки материалов. Поскольку разработчики газовых турбин, котлов и поршневых двигателей стремятся соответствовать нормативам с низким уровнем выбросов при постоянно растущих требованиях к гибкости топлива, они также должны поддерживать или даже улучшать производительность своей системы. Точно так же, проектирование высокопроизводительных материалов и химических процессов с высоким выходом и качеством должно выполняться с минимальным побочным продуктом или отходами. Полагаться на одно только тестирование для точной проверки производительности непозволительно, учитывая современные сложные конструкции и сокращенные циклы проектирования. Эффективное моделирование базовой детальной химии часто имеет решающее значение для экономически эффективного проектирования систем с уменьшенными выбросами загрязняющих веществ или нежелательных побочных продуктов.

Программные решения для вычислительной гидродинамики (CFD) Ansys CFX - это высокопроизводительный программный инструмент для вычислительной гидродинамики (CFD), который быстро предоставляет надежные и точные решения для широкого спектра приложений CFD и мульти физических приложений. CFX известен своей выдающейся точностью, надежностью и скоростью при моделировании турбомашин, таких как насосы, вентиляторы, компрессоры и газовые и гидравлические турбины.

Методы решения:

- обеспечивает в 2 раза более быструю конвергенцию и большие пределы стабильности;
- расширяет применение для моделирования вентиляторов при помехах на входе/выходе и моделирования асимметричных потоков в радиальных компрессорах или турбинах - с многочастотным анализом;
- многочастотный гармонический анализ обеспечивает быстрые решения для сложных переходных периодических потоков;
- многочастотный гармонический анализ обеспечивает быстрые решения для сложных переходных периодических потоков: моделирование вентиляторов на входе/выходе и моделирование асимметричных потоков в радиальных компрессорах или турбинах.

Карта производительности является результатом вашего анализа. Теперь CFX позволяет создавать полные рабочие карты с помощью простого интегрированного процесса. Используя один файл формата карты производительности, CFX генерирует все необходимые результаты, как если бы они были одним прогоном моделирования. Затем он организует их в главную папку для унифицированного анализа.

Надежная фиксация кавитации без эмпирических параметров или настройки. Инженеры должны точно предсказывать кавитацию в различных областях применения, таких как гидронасосы, дизельные форсунки и системы подачи ракетного топлива. Однако классические модели, такие как Rayleigh-Plesset, обладают высокой эмпиричностью и могут возвращать нефизические результаты без тщательной настройки требуемых параметров. Новый подход к моделированию кавитации в CFX использует модель изменения фазы равновесия и опирается только на свойства материала, чтобы надежно предсказать кавитацию без необходимости в эмпирических параметрах модели. Он обеспечивает физически реалистичное решение (например, отсутствие отрицательных абсолютных давлений) без настройки, и естественно включает в себя

физику, такую как термодинамическая головка подавления и изменения давления паров из-за температурных изменений.

Программное обеспечение Ansys CFX - это высокопроизводительная программа гидродинамики общего назначения, которую инженеры применяют для решения широкого спектра проблем, связанных с потоками жидкостей, на протяжении более 20 лет. В основе CFX лежит передовая технология растворителя, которая является ключом к быстрому и надежному достижению надежных и точных решений. Современный высокопараллельный растворитель является основой для широкого выбора физических моделей, которые фиксируют практически любые явления, связанные с потоком жидкости. Решетка и модели окутаны современным, интуитивно понятным и гибким графическим интерфейсом и пользовательской средой с широкими возможностями настройки и автоматизации с использованием файлов сессий, скриптов и мощного языка выражения.

После рассмотрения модулей газовой динамики для решения поставленной задачи принят ANSYS CFX, модуль “Fluid Flow”, что означает поток жидкости. Данный модуль позволяет производить решения в области вычислительной динамики жидкостей и газов. Данный модуль позволяет детально изучить процессы изнутри и оборудование, повысить эффективность, увеличить срок службы и оптимизировать процессы.

На рисунке 18 показан порядок выполнения данной задачи выбранного домена, на котором видно в какой последовательности будет выполняться работа по газодинамическому моделированию сопла установки СЭО.

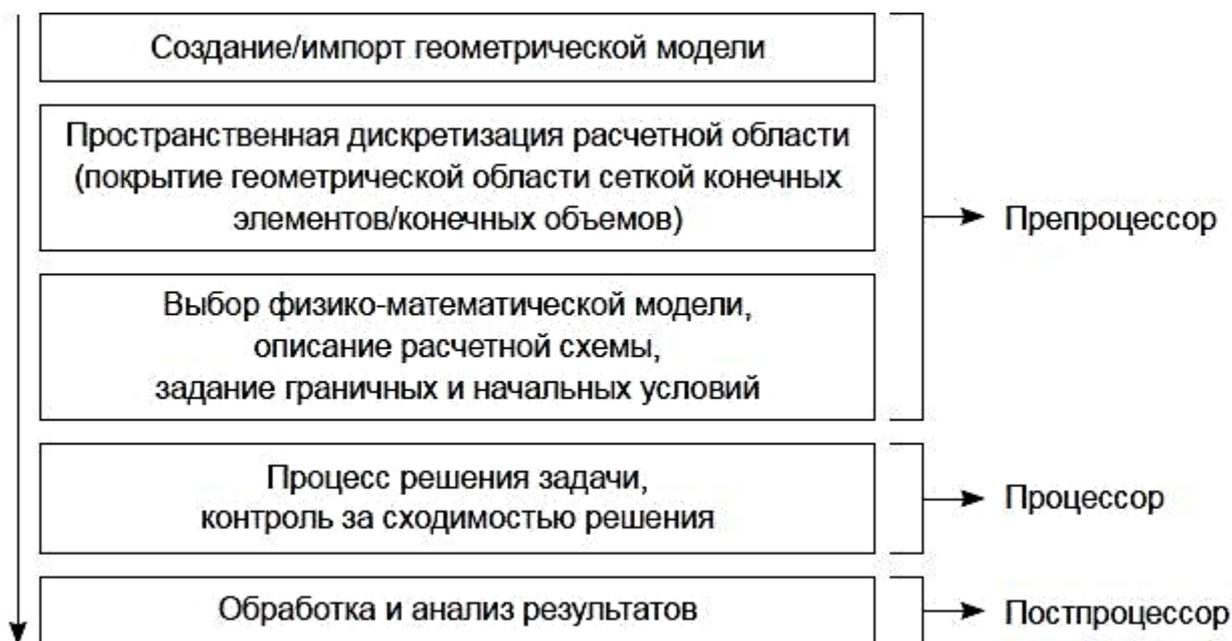


Рисунок 18 – Порядок работы в домене

Проведение расчета в программном комплексе Ansys условно можно разделить на несколько этапов:

1. Построение модели;
2. Подготовка модели для проведения расчетов;
3. Проведение расчетов;
4. Анализ результатов.

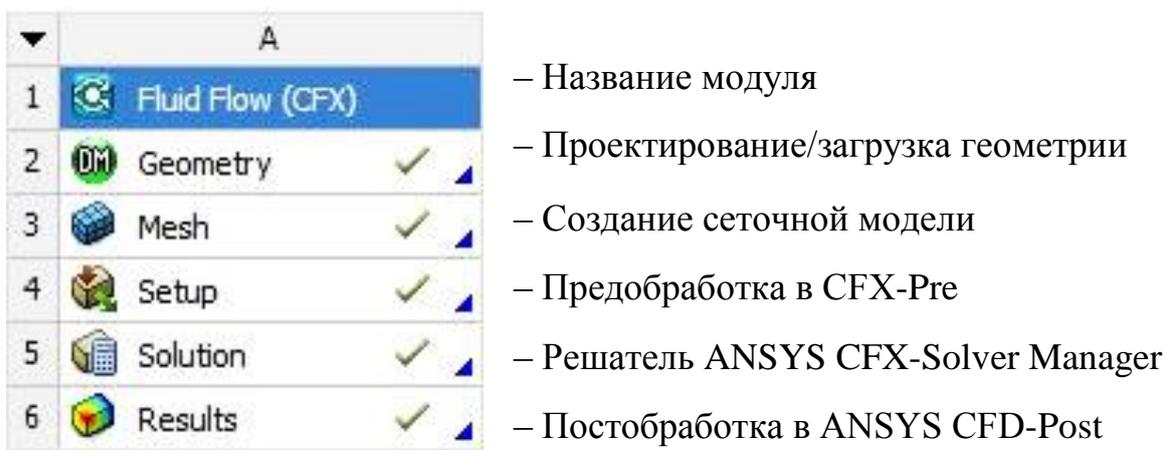


Рисунок 19 – Структурная схема домена

ANSYS DesignModeler был специально разработан для разработки геометрии и подготовки ее к моделированию. Эта полностью параметрическая среда проста в применении, обладает прямыми и двусторонними связями со всеми основными пакетами САПР и применяется в качестве средства сопоставления и ввода геометрии во все программные продукты ANSYS для последующих инженерных расчетов.

Это способствует выбору наиболее подходящего метода построения сетки, основанный на подходе последовательного построения сетки на каждой из частей сборки. Также доступны инструменты сетки ICEM CFD, которые дают возможности редактирования сетки и построения структурированной гексагональной сетки.

Для того, чтобы выполнить объемную модель детали, нужно начертить эскиз. Размерный эскиз сопла представлен на рисунке 20, а объемная модель в разрезе на рисунке 21.

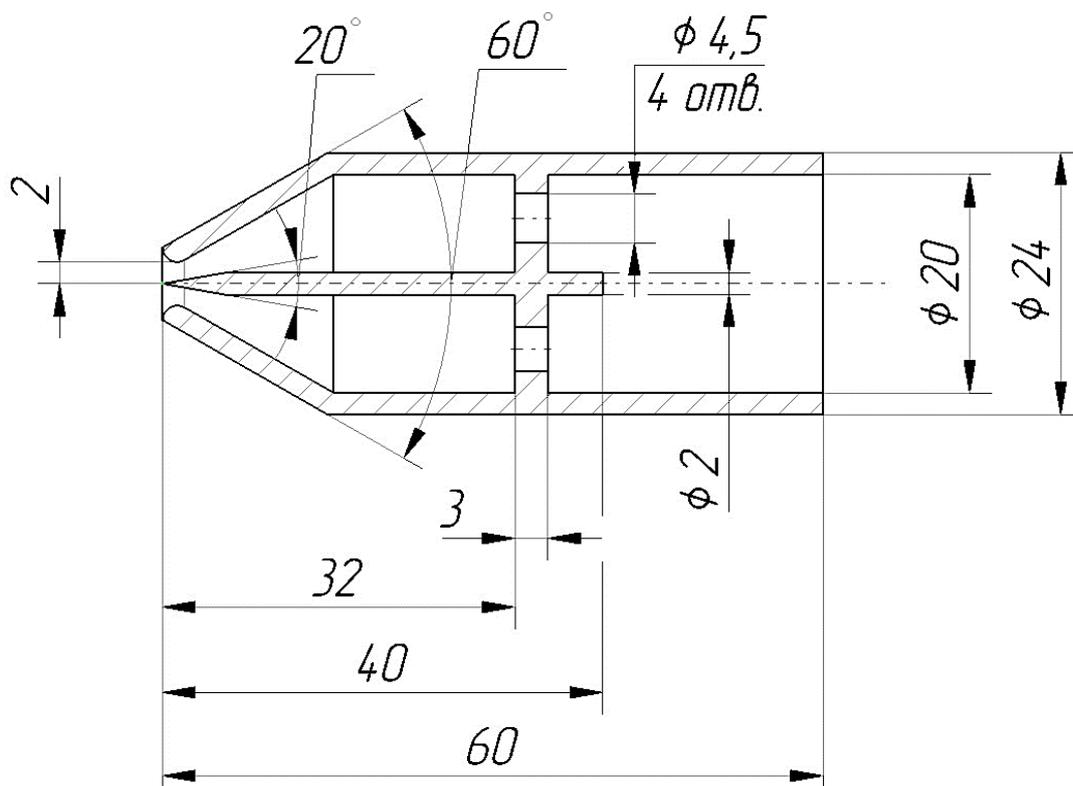


Рисунок 20 – Эскиз сопла

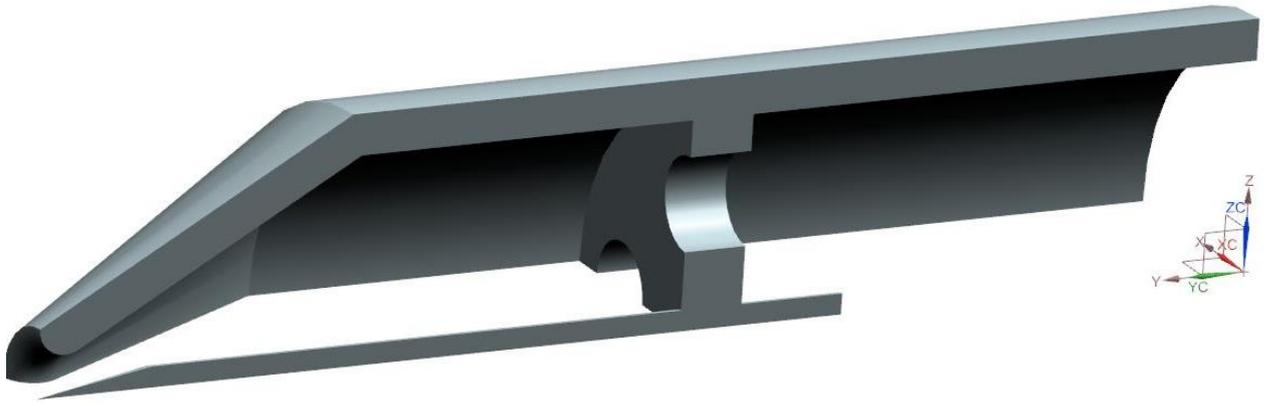


Рисунок 21 – Модель детали в разрезе

Построение геометрии, или как в нашем случае, загрузка модели проводится в пункте домена под названием “Geometry”. Для этого нажимаем Geometry – Import Geometry – Browse, как показано на рисунке 22. А на рисунке 23 показана загруженная модель.

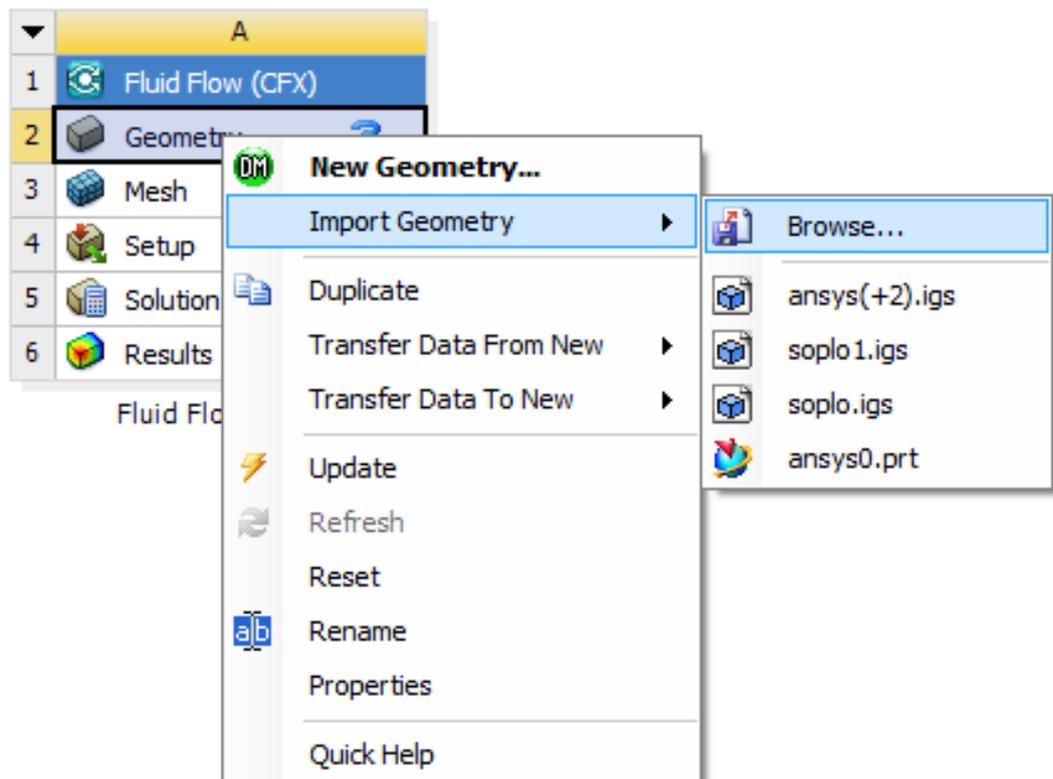


Рисунок 22 – Загрузка геометрии



Рисунок 23 – Схема первоначальной модели

Что бы провести анализ данной работы, нам необходимо построить модель внутренней части сопла со схематической средой, для четкого представления того, как будет проходить ионизированный воздух, какое будет развиваться давление, скорость и температура на кончике сопла. Для получения максимально соответствующих параметров подбирались нужные размеры сопла и вылета иглы. С помощью корректировки данных размеров, следовательно, менялись скорость и давление. После, будут задаваться граничные условия, которые будут рассмотрены позже.

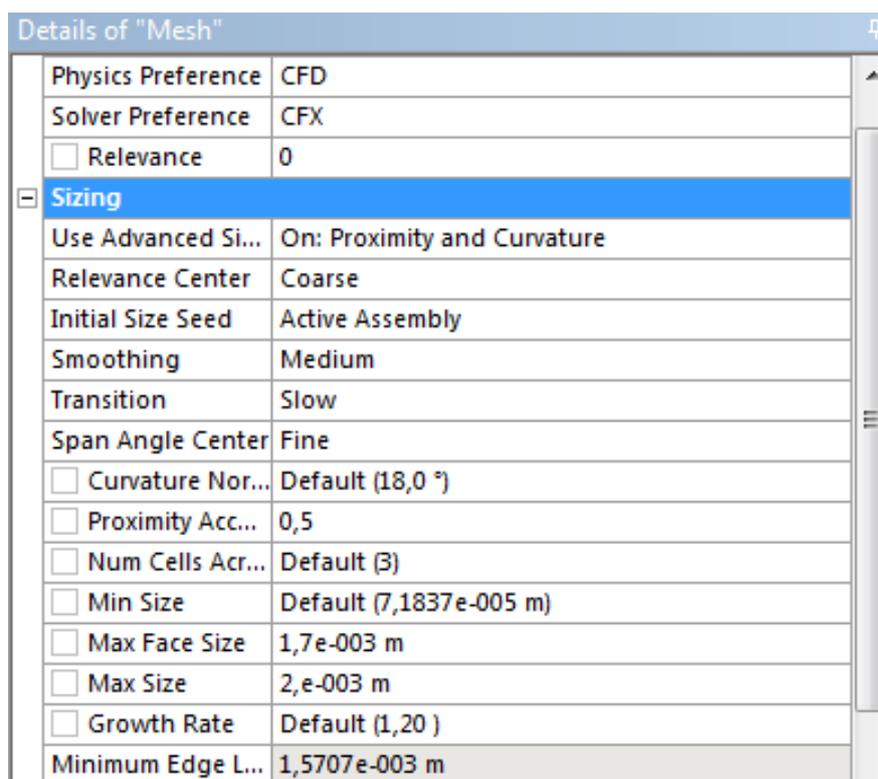
2.2 Построение сетки

Точная сетка обязательна для получения точных расчетов нашего анализа. Ровно как, на качество сетки влияет сходимость и скорость решения. Чем меньше значение сетки, тем точнее будет анализ, но для решения поставленной задачи потребуется больше времени.

Чтобы создать модель сетки, перейдите к элементу Mesh на блок-схеме модуля Fluid flow (CFX) на рисунке 19. ANSYS Meshing позволяет указать специальные настройки сетки в требуемой зоне модели с помощью команды

Mesh Control - Sizing. Чтобы сетка лучше адаптировалась под геометрию в строке “Use Advance Size Function” выбираем “Proximity and Curvature”.

Для нас наиболее интересно, чтобы поверхности были симметричны относительно оси. На вкладке «Sizing» выберите минимальное и максимальное разрешение сетки «Min Size», «Max Size». Чтобы применить настройки сетки, нажмите кнопку «Update». На вкладке «Statistics» вы можете увидеть полученные номера узлов и элементов. В областях, где перепад параметров будет сильно меняться, сетку необходимо сгустить, сделать меньше стандартных объемов, для того что бы сетка стало более насыщенная и при исследовании результатах получились точные данные. Параметры сетки показаны на рисунке 24.



Details of "Mesh"	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Si...	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Proximity Acc...	0,5
<input type="checkbox"/> Num Cells Acr...	Default (3)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (7,1837e-005 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	1,7e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Size	2,e-003 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge L...	1,5707e-003 m

Рисунок 24 – Параметризация сетки

Далее сделаем сгущение возле стенки верхней границы при помощи кнопки “Inflation” рисунок 25.

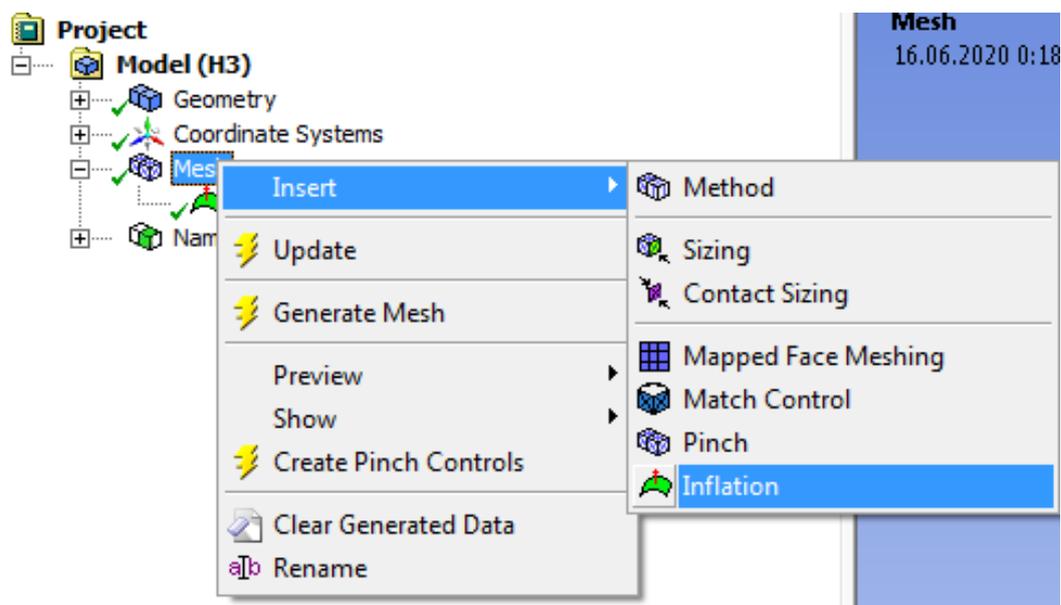


Рисунок 25 – Задание густоты сетки

Выбираем геометрию, которой является вся геометрия рисунок 26. Вторым пунктом выбираем стенку “Wall”, возле которой будем делать сетку плотнее. В строчке “Inflation Thickness” в качестве опции сжатия задаем общую толщину сгущения.

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Named Selections
Boundary	Wall
Inflation Option	Total Thickness
<input type="checkbox"/> Number of Layers	25
<input type="checkbox"/> Growth Rate	0,8
<input type="checkbox"/> Maximum Thickness	1,7e-003 m
Inflation Algorithm	Pre

Рисунок 26 – Параметризация сетки

Чтобы получить более детальную информацию для построения графиков распределения скоростей и давления, вблизи границ, заданных в поставленной задаче, необходимо уплотнить сетку на данных границах рисунок 28.

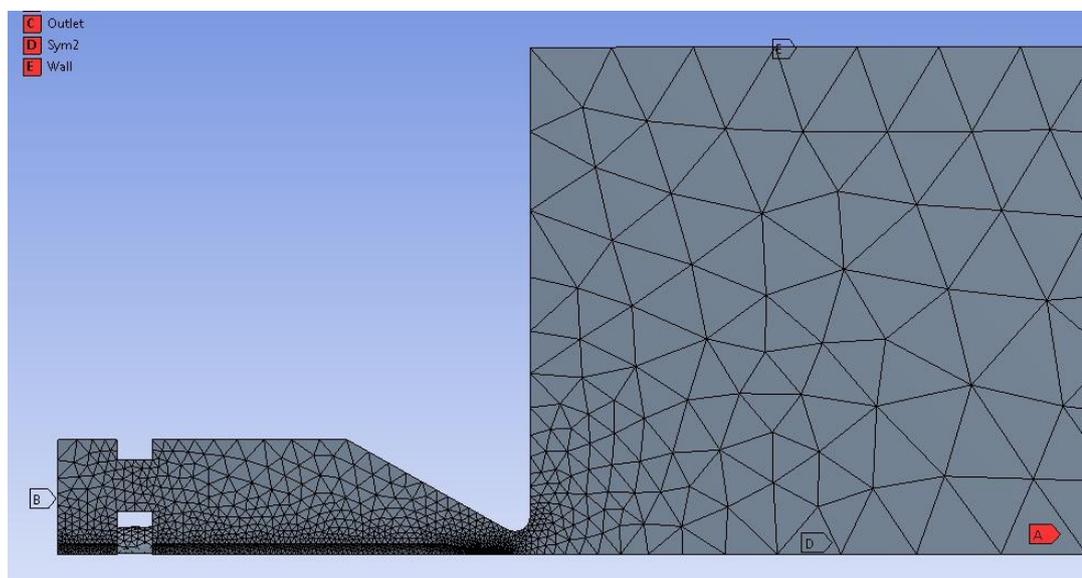


Рисунок 27 – Стандартная сетка

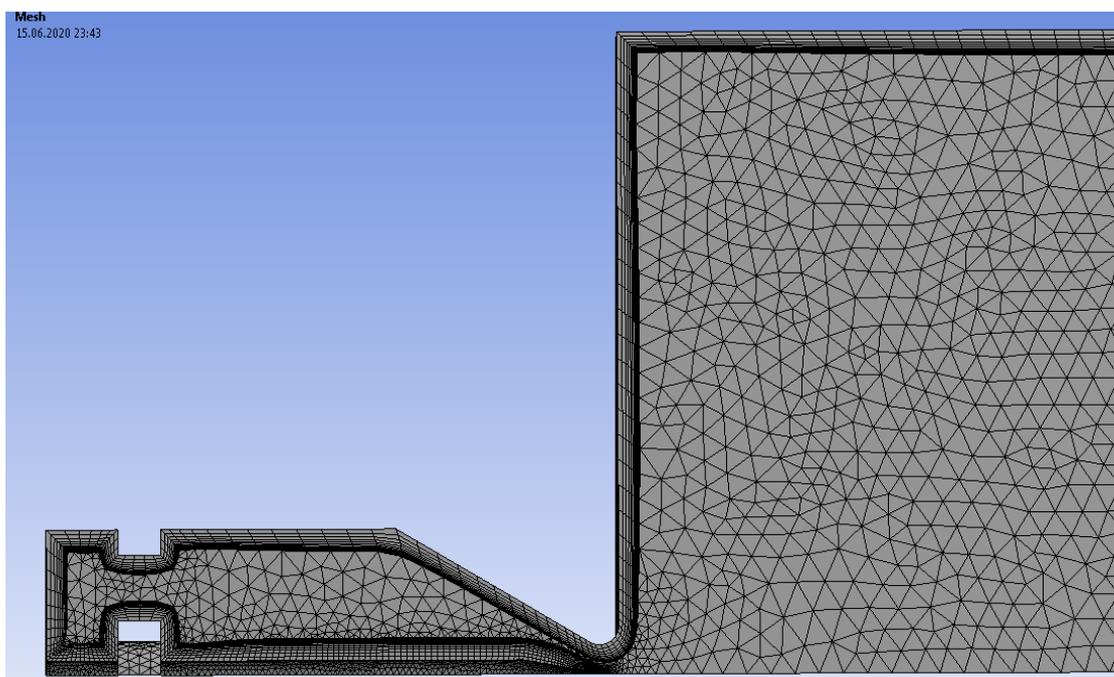


Рисунок 28 – Откорректированная сетка

После того, как сетка была задана, переходим к следующему пункту нашей вычислительной работы, который состоит в том, чтобы задать наименования представленным двумерным частям, которые определяют границу расчетной области, в дальнейшем на эти области мы будем задавать граничные условия. В данном случае нас интересуют граничные условия на стенке сопла, на выходе из расчетной области, на входной части рассматриваемого течения и две симметрии плоскости.

Что бы дать наименование нашим частям, необходимо выбрать первую поверхность симметрии. Для того, что бы выбрать нужную поверхность активируем дополнительную кнопку “Face”, и выбираем нужную нам поверхность. После выбора она окрасится в зеленый цвет. Далее нажимаем правой кнопкой мыши для вызова дополнительного окна и выбираем “Created Named Selection” рисунок 29, что означает создать именованный выбор.

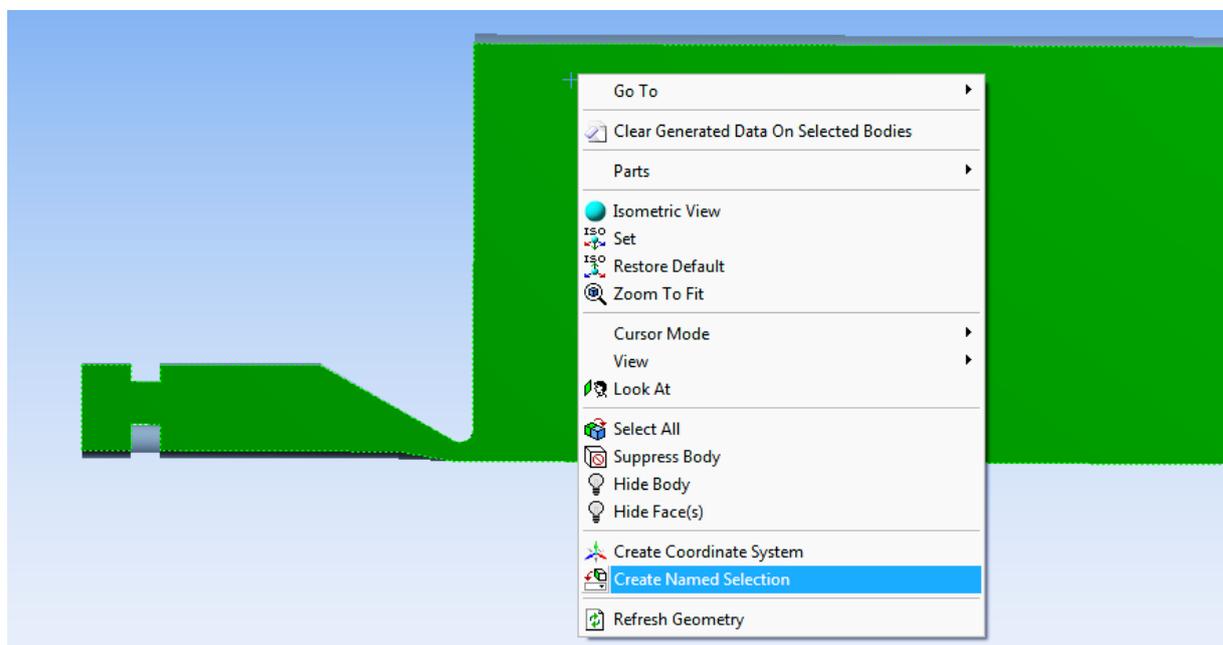


Рисунок 29 – Именованный выбор

Для реализации осесимметричной постановки задачи надо задать граничные условия на поверхностях, симметричных относительно

вертикальной оси. Наименования поверхности даем “Symmetry1” как показано на рисунке 30. Точно так же выбираем вторую симметрию и называем её “Symmetry2”.

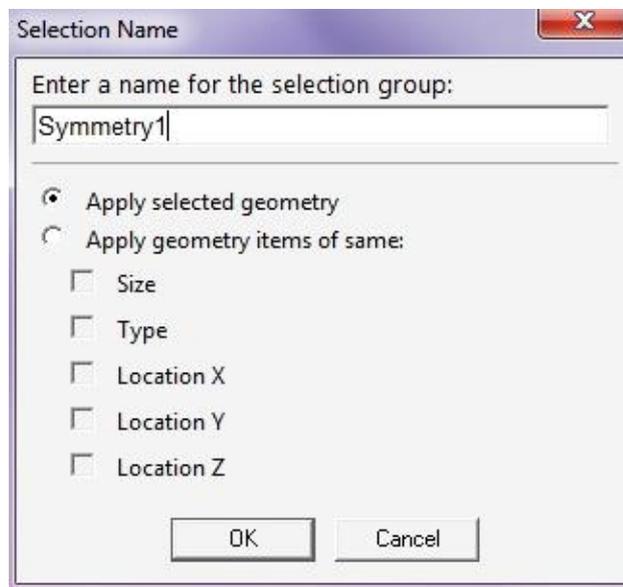


Рисунок 30 – Наименование объекта

В Ansys, как и в большинстве других программ имеет смысл использовать смысловые названия частей, поэтому следующую поверхность была названа “Inlet”, что означает вход рисунок 31.

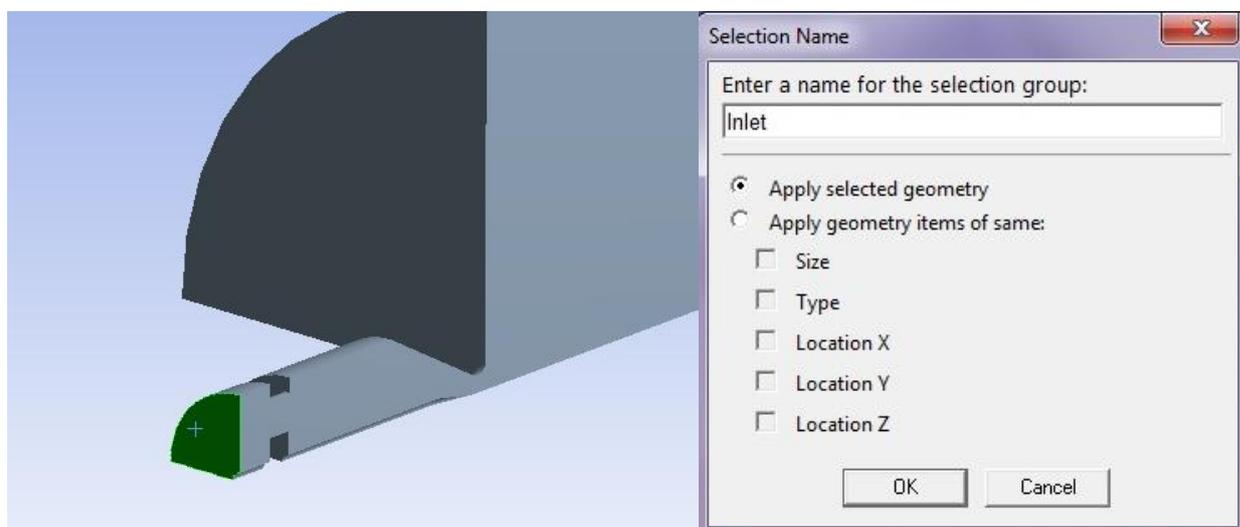


Рисунок 31 – Входная часть

Следующая поверхность – стенка. Мы будем выделять стенку компрессора и стенки сопла. Мы использовали одинаковые граничные условия на все выделенные части стенки рисунок 32.

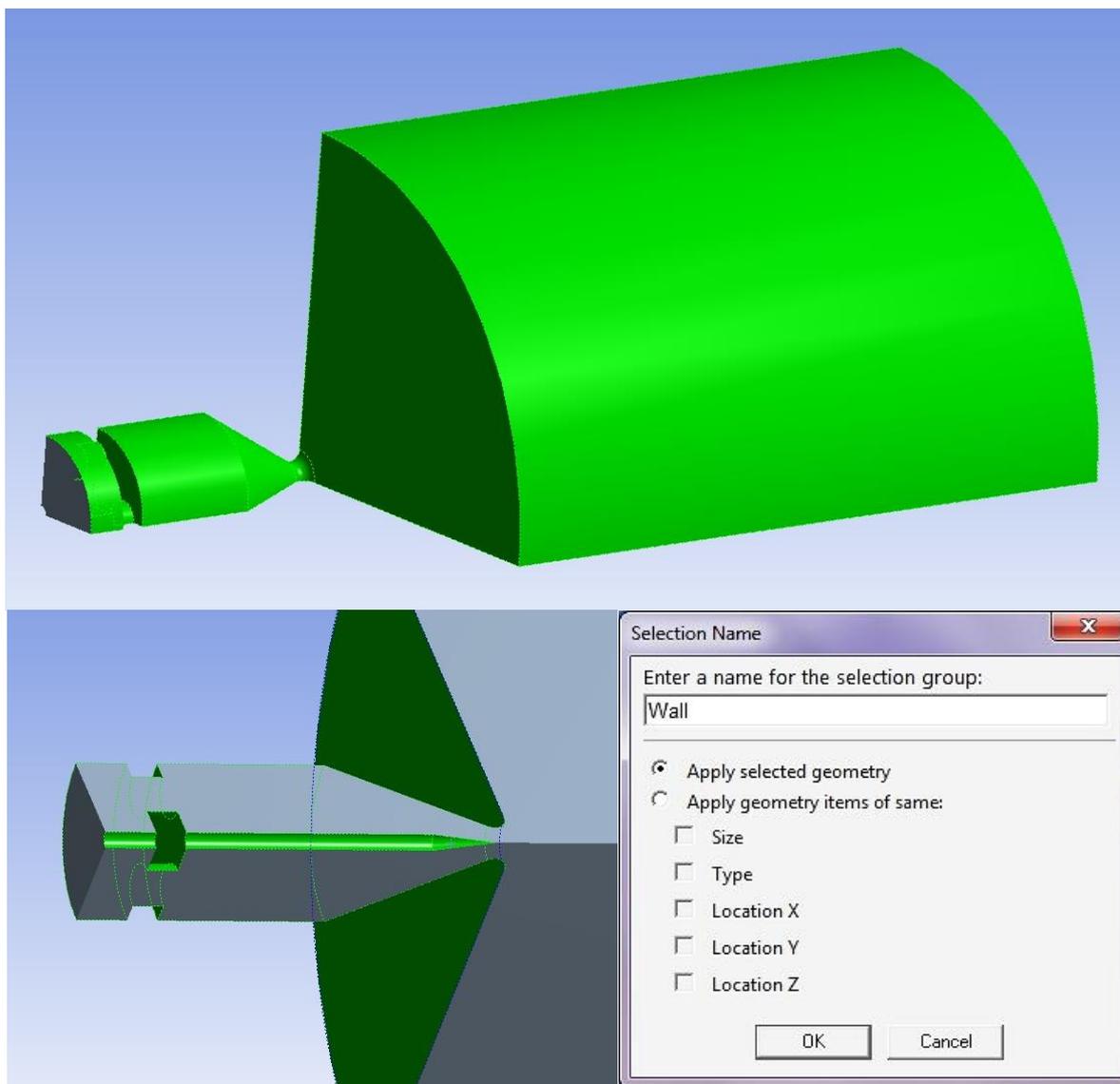


Рисунок 32 – Стенка

Далее даем наименование выходной части нашей модели и дадим ей наименование поверхность “Outlet”, нажимаем ОК, что бы применить заданное наименование.

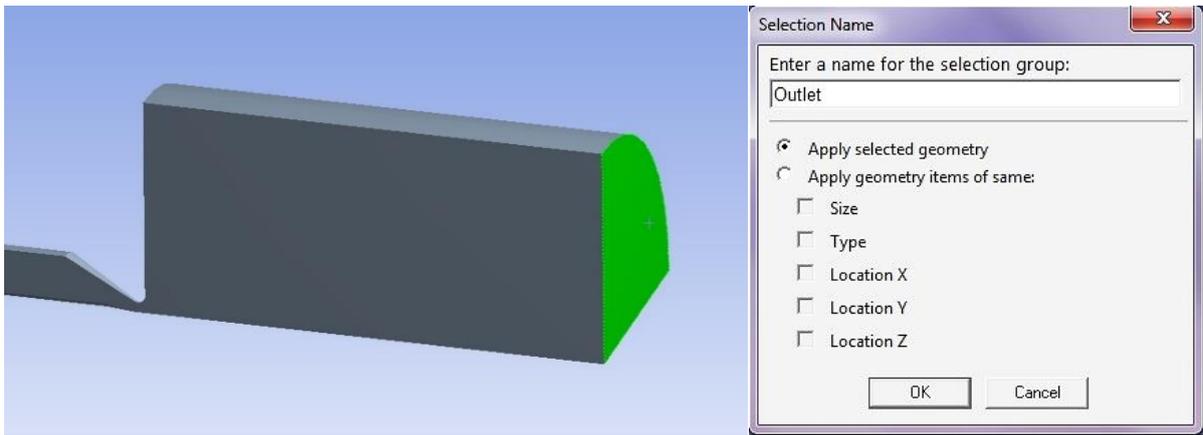


Рисунок 33 – Выходная часть

В дереве построения теперь видны все наши названные поверхности.

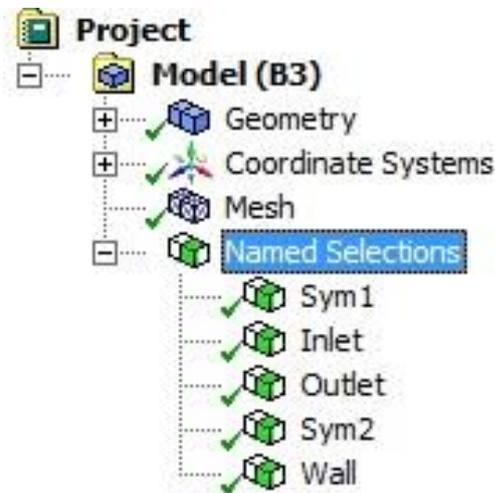


Рисунок 34 – Дерево модели

2.3 Назначение исходных данных

В данном пункте проводилась работа в предобработке под названием CFX-Pre. Физический препроцессор импортирует геометрию и сетку, созданную перед этим. Это последующее действие постановки задачи, на котором формируются физические модели, на основе которых будет происходить симуляция процесса, а также их основные параметры и характеристики. CFX-Pre определяет начальные и граничные условия

процесса, такие как входные и выходные параметры. Для того чтобы открыть программу, следует выбрать «Setup» в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX).

Расчет проводился на идеализированном расчетном теле, конкретно воздух и его свойства были заданы, как свойства идеального газа. Вместе с геометрией импортировались и названия границ.

Первым шагом в свойствах нашего домена “Default Domen” задаем свойства рабочего тела. В первой вкладке “Basic Setting” выбираем нашу расчётную область в поле “Location” в качестве типа домена выбираем “Fluid Domain”, что означает жидкостный домен, как на рисунке 35.

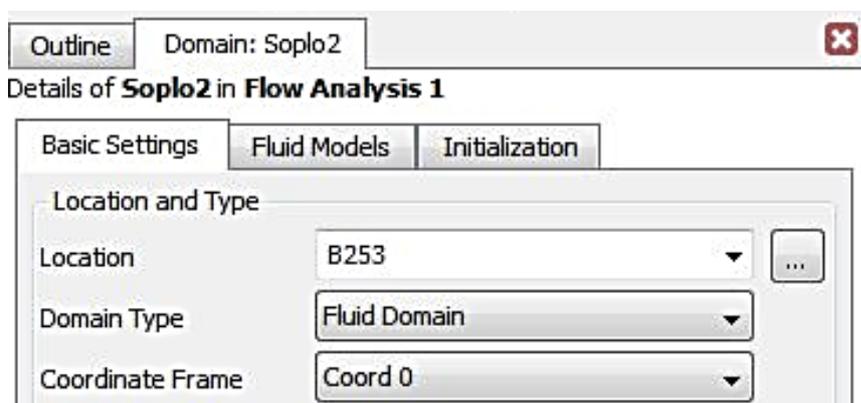


Рисунок 35 – Выбор типа домена

Далее выбираем единственное рабочее тело “Fluid 1” и в строке “Option” выбираем из библиотеки материалов идеальный газ, так как будут отсутствовать физические противоречия. Давление всей области «Preference Pressure» – 1 atm.

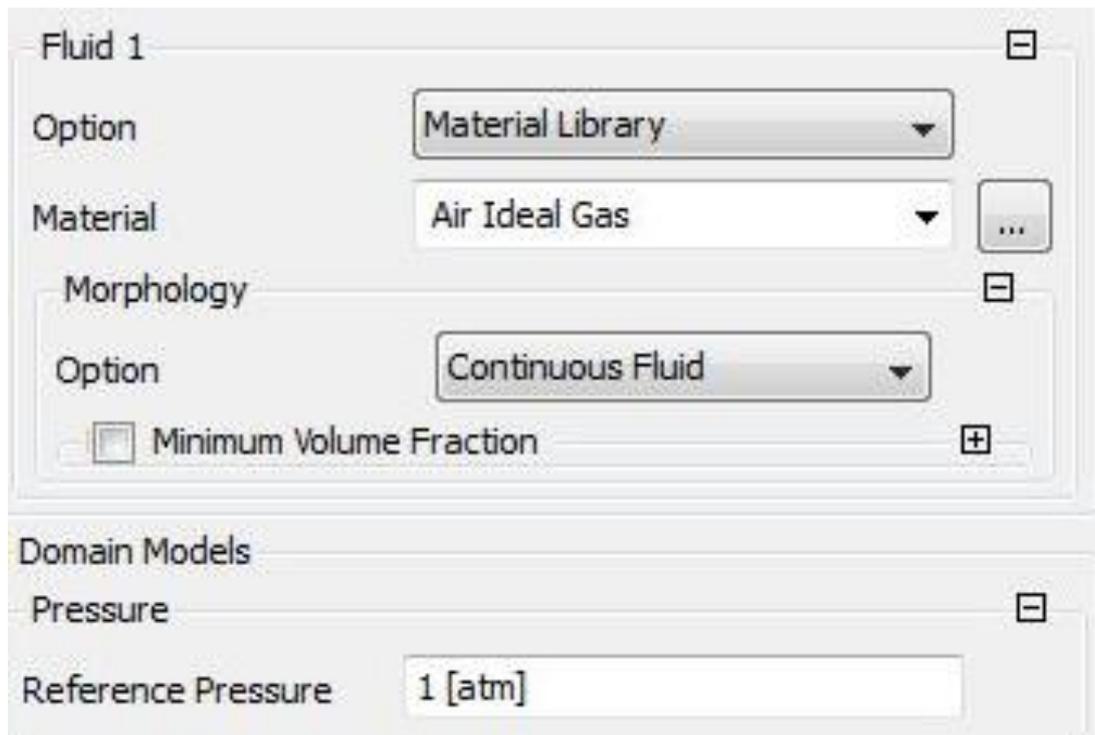


Рисунок 36 – Выбор материала

Во второй вкладке “Fluid Models” нужно выбрать модель тепловых процессов передачи тепла, а точнее, какой тип уравнения решаем для расчета температуры уравнения энергии.

В строке “Option” выбираем “Total Energy”, что означает полная энергия, так как у нас есть область течения со сверхзвуковой скоростью. Далее нужно нажать кнопку “ОК” для применения заданных свойств к модели.

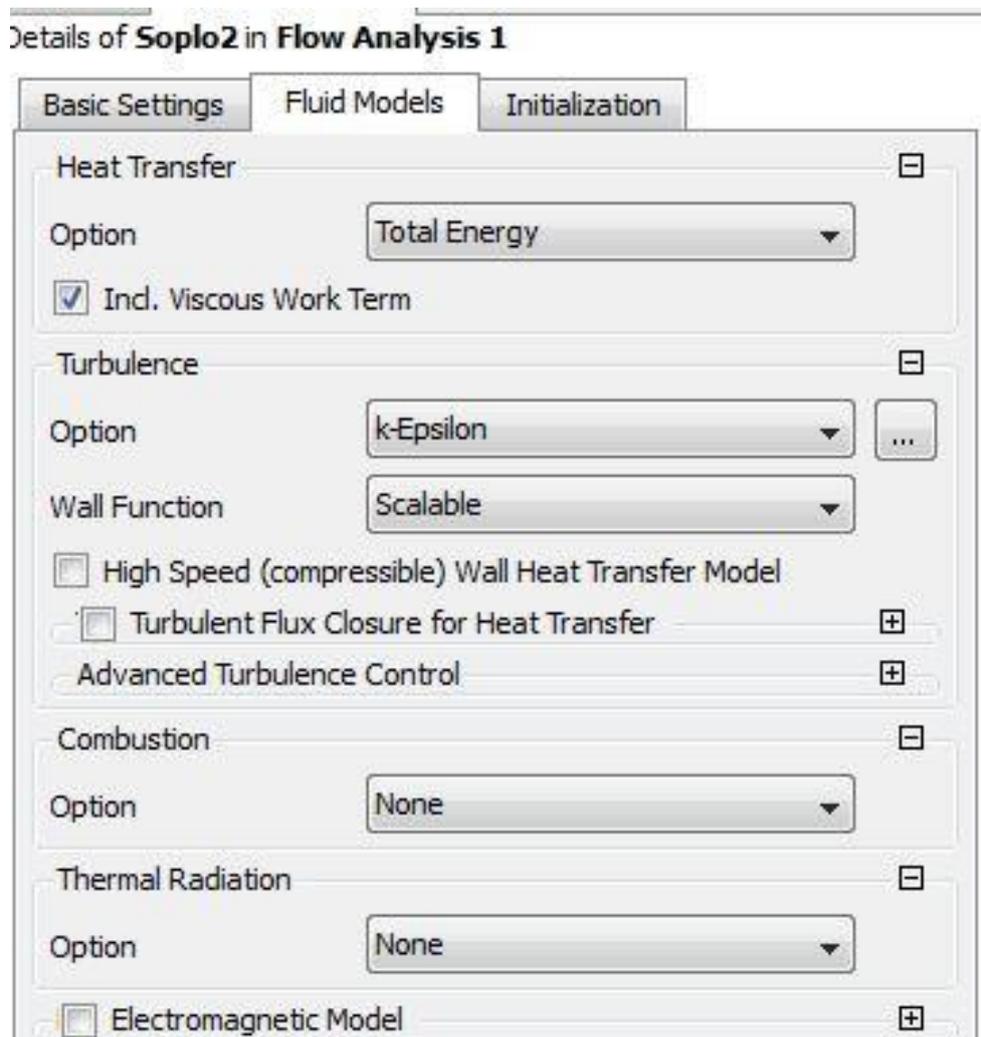


Рисунок 37 – Выбор типа уравнения

Для определения начальных условий переходим во вкладку «Initialization». Определяем начальные значения для компонентов вектора скорости, относительное давление «Relative Pressure» выбираем равным нулю, начальную температуру жидкости – 20 [C]. Нажимаем кнопку ОК.

Следующий пункт - это задание граничных условий. Граничные условия задаются при помощи “Named Selection”, которые были заданы в предыдущем пункте. Граничные условия бывают разных типов, которые были рассмотрены. Задаем первое граничное условие на входе, через который подается наш идеальны газ. Что бы задать граничное условие на входе выбираем Inlet – Insert – Boundary – Inlet.

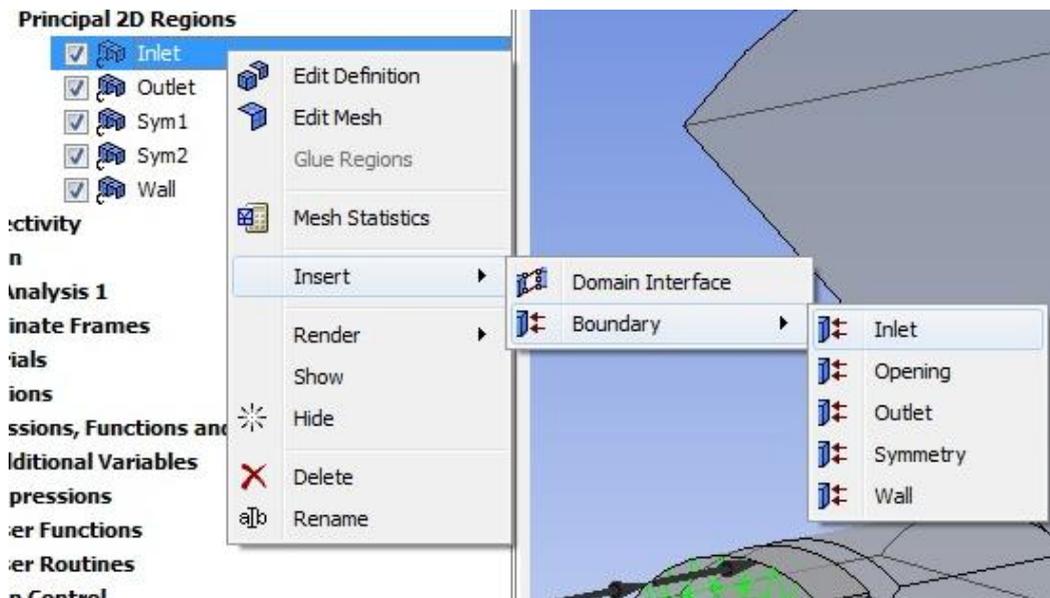


Рисунок 38 – Граничные условия

Появится окно для задания параметров граничного условия. В «Basic Settings» выбираем тип «Boundary Type» и область граничного условия.

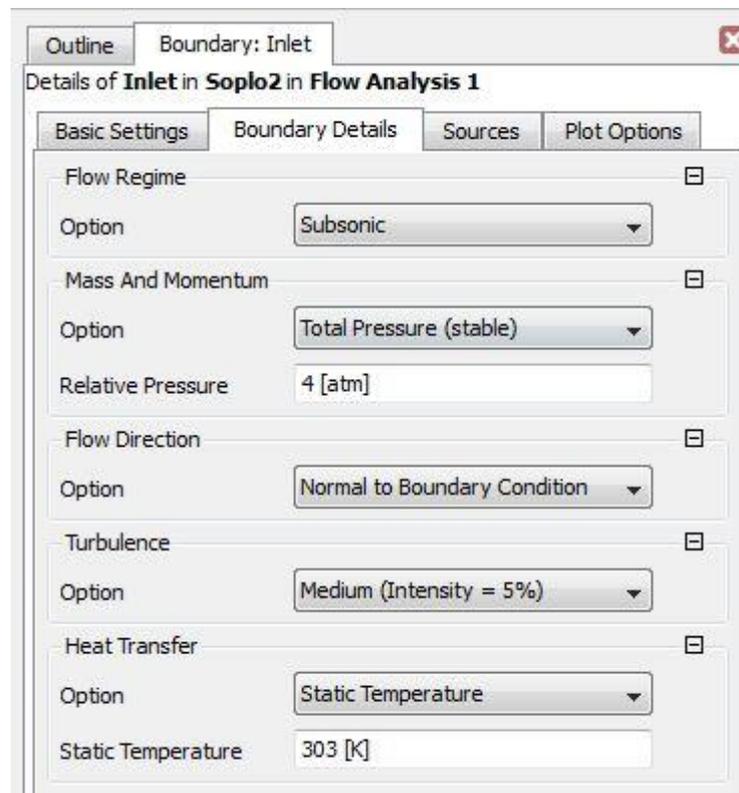


Рисунок 39 – Назначение данных для граничных условий

Следующий тип – это граничное условие симметрии.

Заходим в пункт “Solution” в нашем домене, что означает решение. В появившемся окне будем работать с Initialization Option. В выпадающей строке выбираем Current Solution Data, как показано на рисунке 40 и запускаем расчет нажатием кнопки Start run.

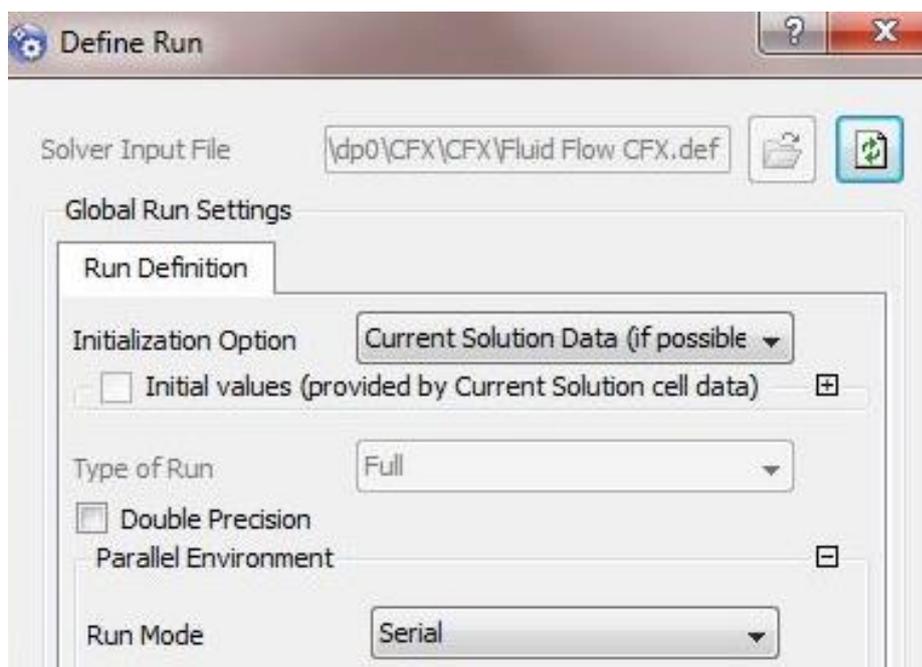


Рисунок 40 – Запуск решения

2.4 Представление результатов

ANSYS CFD-Post – это программа, предназначенная для анализа, визуализации и представления результатов, полученных в ходе решения задачи посредством ANSYS CFX-Solver. Для этого используются следующие средства:

- визуализация геометрии и исследуемых областей,
- векторные графики для визуализации направления и величины потоков,

- визуализация изменения скалярных величин (такие как температура, давление) внутри исследуемой области.

Для того, чтобы просмотреть результаты нашей поставленной задачи заходим в последний модуль “Results” в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX) рисунок 3.

Для начала введем график линий уровня с использованием цветной градиентной заливки «Contour Plot» на интересующую нас поверхность, выбрав Insert -> Contour . С помощью «Contour Plot» можно будет посмотреть изменение какой-либо физической величины в данной области.

В окне «Details» следует выбрать область и переменную для построения графика. Так же можно выбрать число контуров прорисовки. График зависимости скорости от времени в точке для точности

Первым делом выбираем симметрию “Symmetry 1” и ставим галочку в дереве построения. На данном этапе наша геометрия окрашена в однородный оттенок.

Во вкладке “Color” выбираем в строке Mode – Variable. Теперь выбираем величину на которой хотим посмотреть результаты расчета. Нас интересуют результаты скорости, давления и температуры.

Первое просмотрим результаты давления, для того выбираем “Total pressure” и мы видим иллюстрацию распределения давления, которое измеряется в Pa.

Результаты расчета по модели смещением 0 показаны на рисунках 41 и 42.

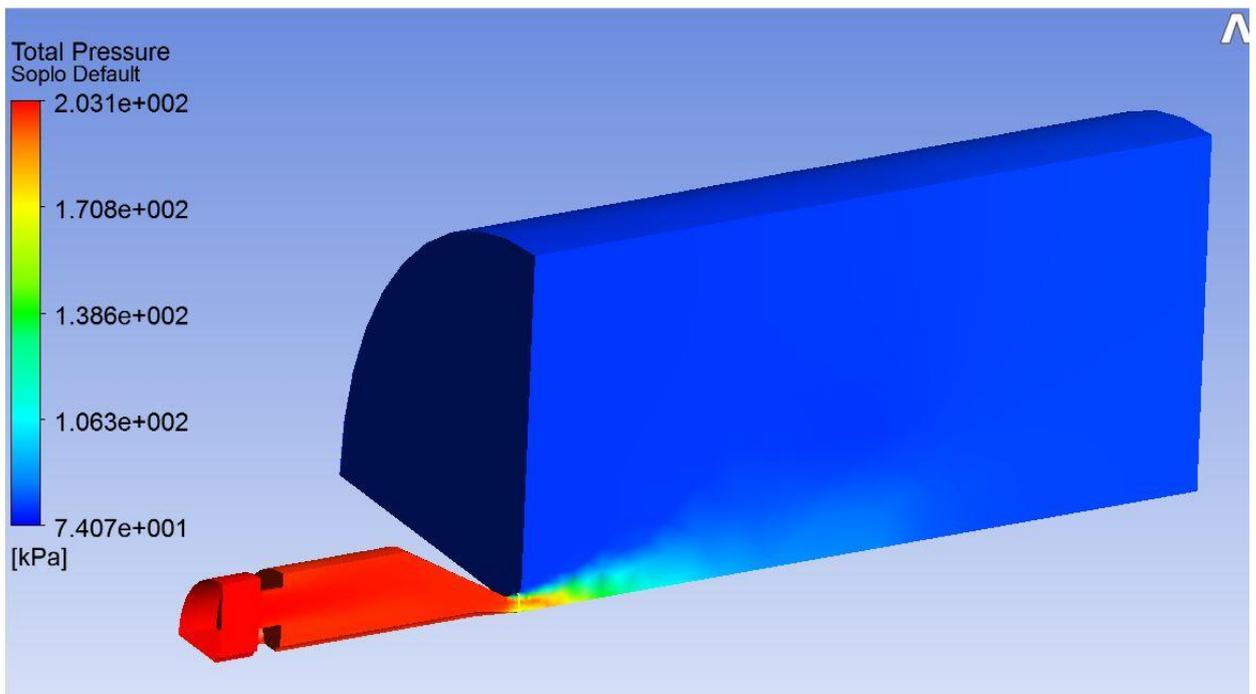


Рисунок 41 – Поле давлений на смещении 0

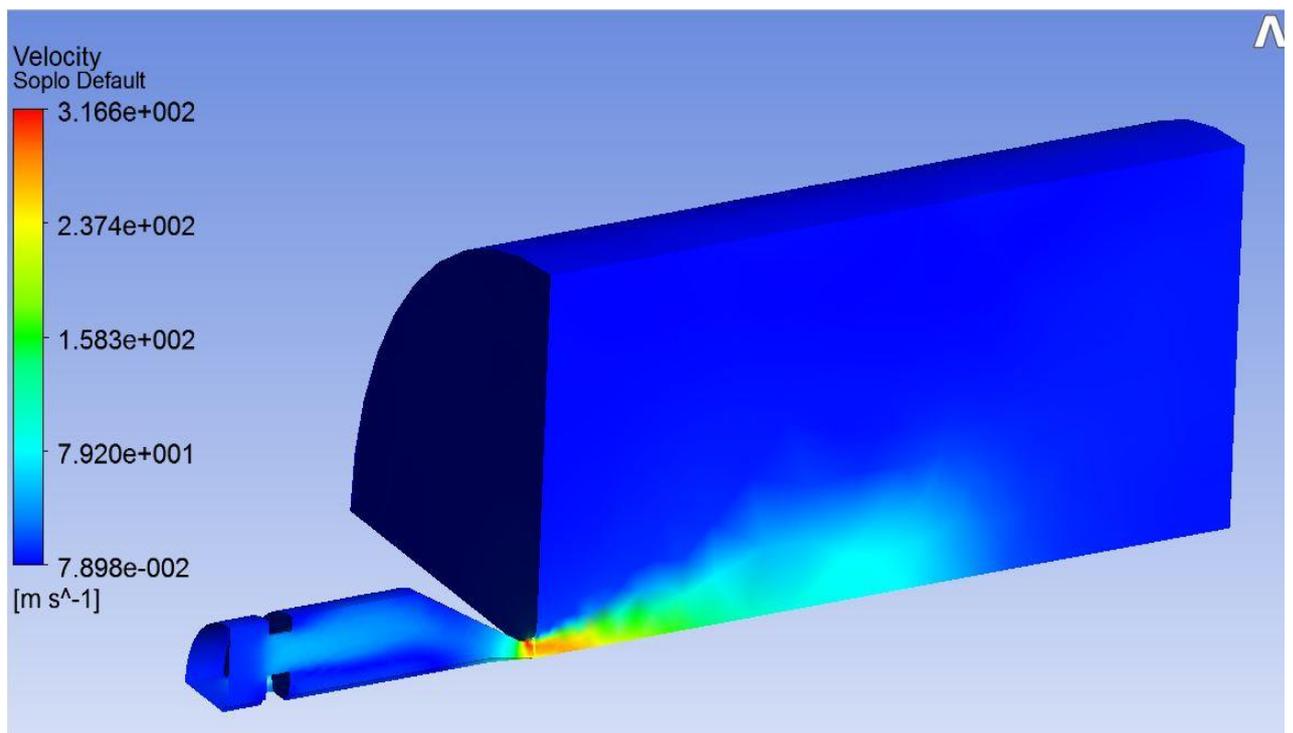


Рисунок 42 - Поле скоростей на смещении 0

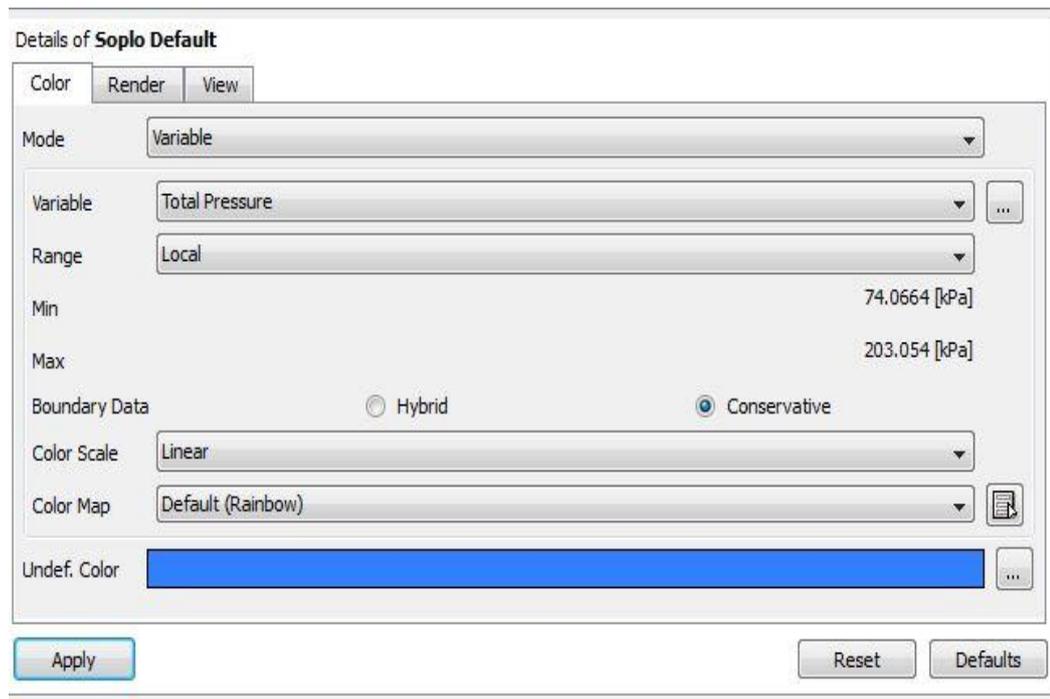


Рисунок 43 - Поле скоростей на смещении 0

По распределению давлений (рисунок 41) видно, что давление в полости конического конфузора незначительно отличается от давления в исходной области (до держателя иглы), что свидетельствует о том, что диаметр отверстий для прохода воздуха в держателе иглы достаточен, и увеличение его не приведет к увеличению эффективности сопла.

По распределению скоростей (рисунок 42) видно, что максимальных скорости поток достигает за срезом сопла, и смещение области коронного разряда за срез сопла потенциально повысит эффективность сопла, но при этом необходимо учесть, что смещение иглы также повлияет на газовую динамику потока.

Окончательно ответить на вопрос о целесообразности и величине смещения иглы можно по результатам дальнейшего моделирования.

Схема опытов представлена в таблице 3.

Таблица 3- Схема опытов

№ опыта	Смещение иглы, мм	Смещение иглы, R	Эскиз
1	0	0	
2	-2	-R	
3	-4	-2R	
4	2	R	
5	4	2R	

Результаты моделирования (поля скоростей) показаны на рисунках 44 – 47.

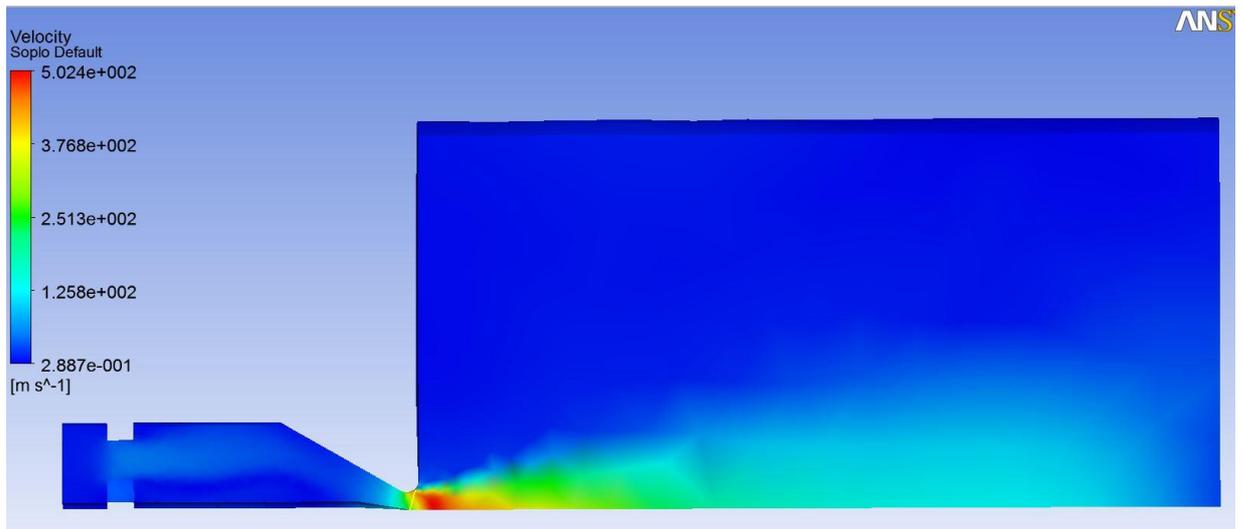


Рисунок 44 - Поле скоростей на смещении $-R$ (опыт 2)

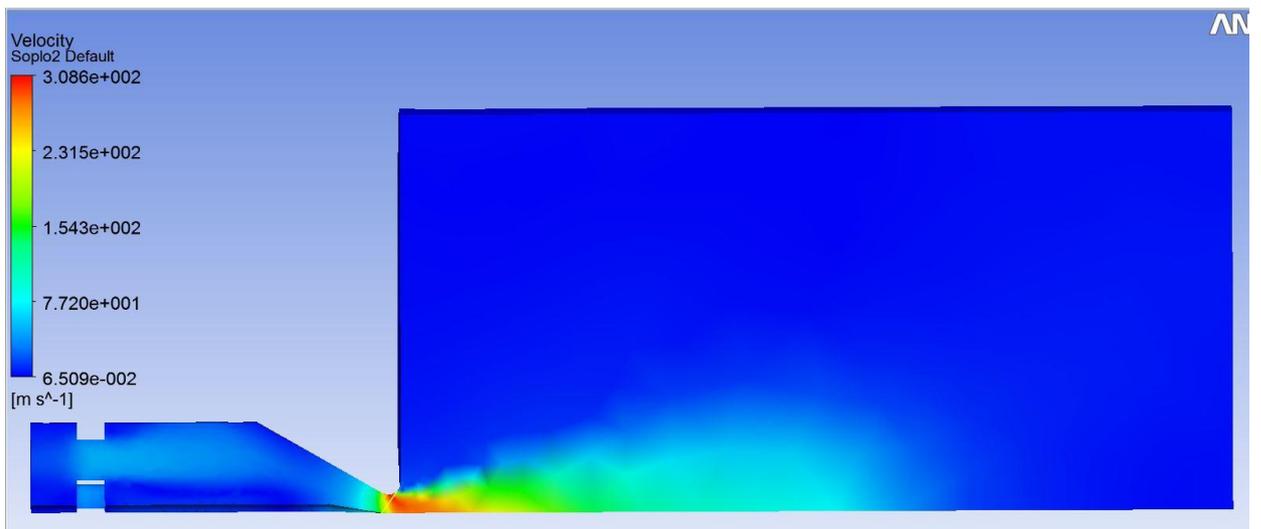


Рисунок 45 - Поле скоростей на смещении $-2R$ (опыт 2)

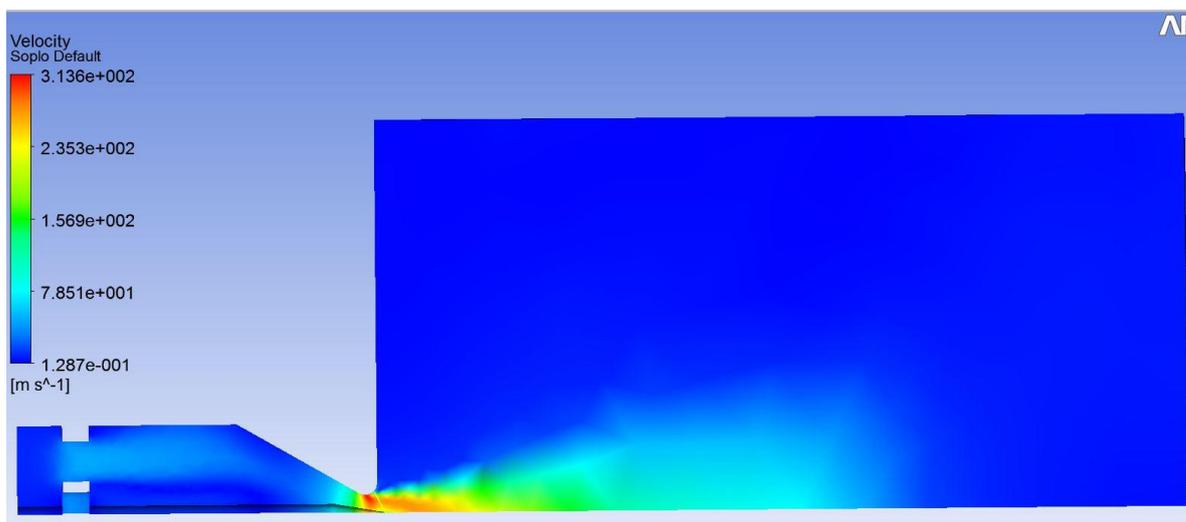


Рисунок 46 - Поле скоростей на смещении R (опыт 2)

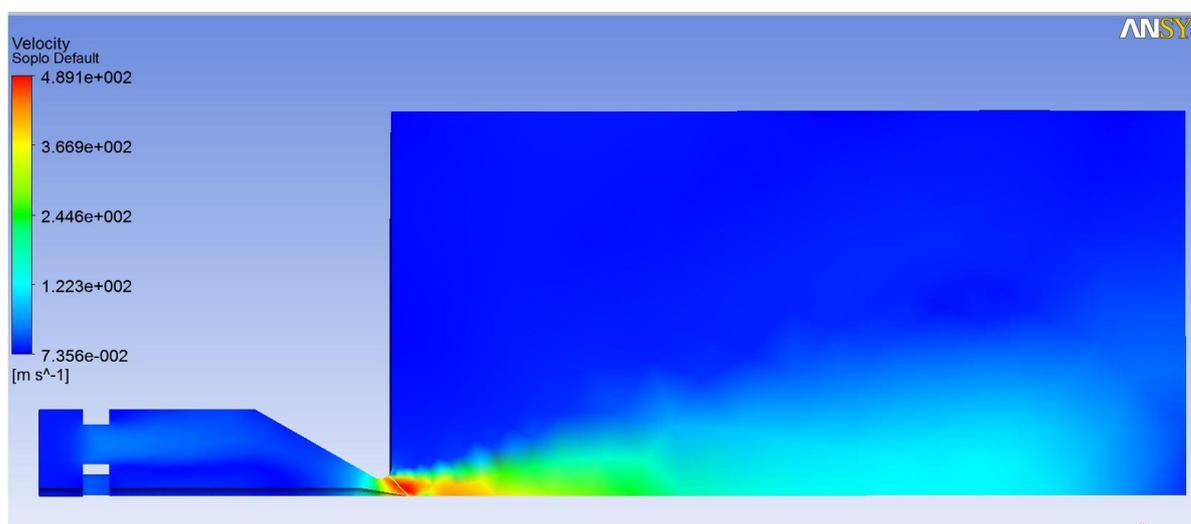


Рисунок 47 - Поле скоростей на смещении 2R (опыт 2)

Визуально по рисункам 44 – 47 можно заключить, что смещение иглы в наружную сторону (из сопла, в направлении «+») переносит корону в область больших скоростей потока, но при этом возникает вероятность пробоя между телом иглы и соплом в месте наименьшего радиуса сопла. Поэтому, даже если увеличение вылета иглы свыше $+2R$ в рамках построенной модели обеспечит еще большую эффективность, рассматривать этот случай не целесообразно. Напротив, имеет смысл рассмотреть случай вылета иглы $+1,5R$ (опыт 6).

Результаты моделирования показаны на рисунках 48, 49.

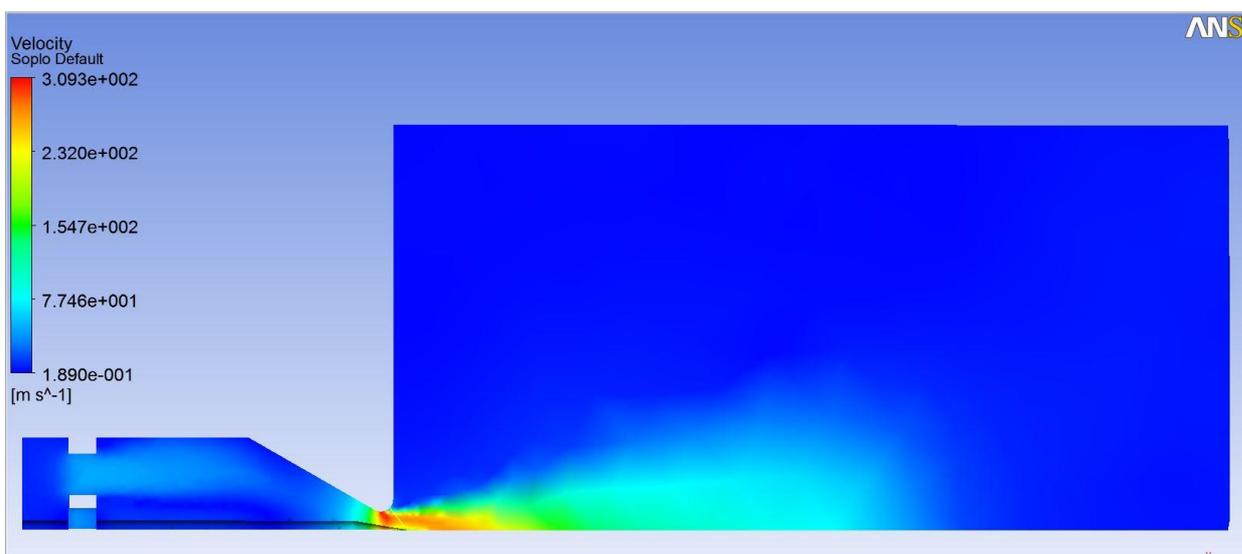


Рисунок 48 - Поле скоростей на смещении 1,5R (опыт 6)

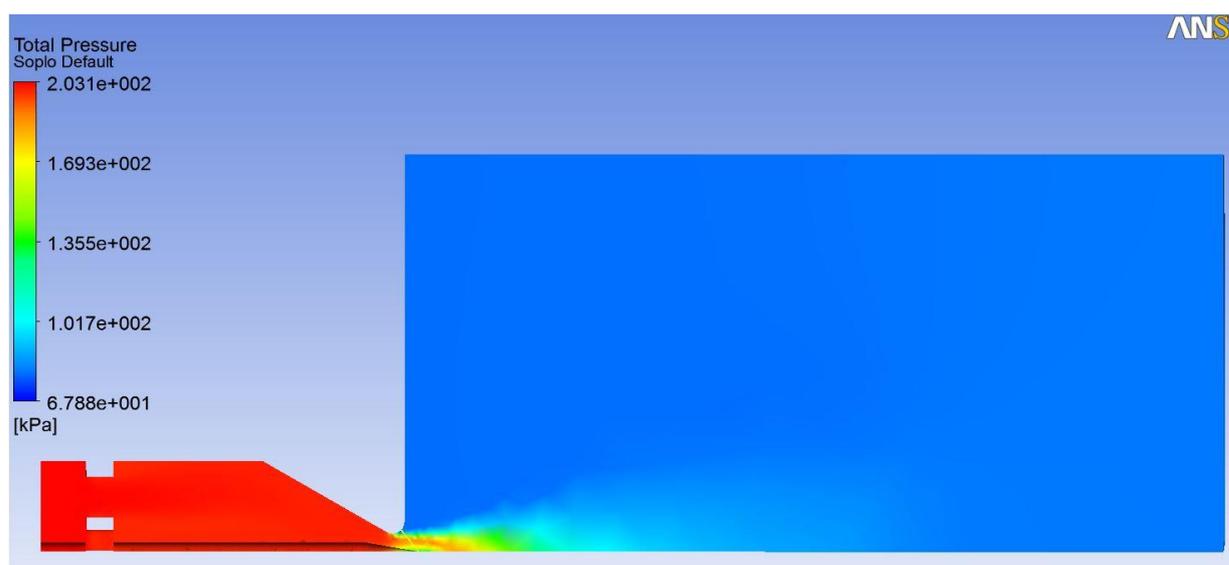


Рисунок 49 - Поле давлений на смещении 1,5R (опыт 6)

В целом результаты моделирования соответствуют физике процесса и могут быть использованы для анализа.

В ходе анализа данные (значения точек поля скоростей по пути интегрирования от конца иглы до ближайшей точки сопла) экспортированы из ANSYS в Excel через обменный контейнер *.csv.

2.5 Анализ результатов

При расчете элементов $v \cdot dl$ интегральной суммы использованы интервалы расстояния dl от текущей точки до следующей.

Таблица 4 - Данные поля скоростей по пути интегрирования (смещение 0)

Координата, l, м	Скорость, v, м/с	$v \cdot dl$, м ² /с
0,00241	216	0,0578
0,00214	254	0,0680
0,00187	267	0,0713
0,00160	274	0,0734
0,00134	284	0,0760
0,00107	286	0,0764
0,00080	265	0,0708
0,00053	229	0,0613
0,00027	141	0,0378
0,00000	41	
Сумма		0,5930

Таблица 5 - Данные поля скоростей по пути интегрирования (смещение -R)

Координата, l, м	Скорость, v, м/с	$v \cdot dl$, м ² /с
0,00271	174	0,0525
0,00241	200	0,0603
0,00211	210	0,0632
0,00180	225	0,0676
0,00150	241	0,0724
0,00120	264	0,0794
0,00090	280	0,0841
0,00060	300	0,0903
0,00030	277	0,0834
0,00000	135	
Сумма		0,6531

Таблица 6 - Данные поля скоростей по пути интегрирования (смещение–2R)

Координата, l, м	Скорость, v, м/с	$v*dl, м^2/с$
0,00333	157	0,0580
0,00296	187	0,0694
0,00259	209	0,0774
0,00222	229	0,0846
0,00185	256	0,0947
0,00148	280	0,1038
0,00111	297	0,1098
0,00074	279	0,1034
0,00037	182	0,0672
0,00000	64	
Сумма		0,7684

Таблица 7 - Данные поля скоростей по пути интегрирования (смещение R)

Координата, l, м	Скорость, v, м/с	$v*dl, м^2/с$
0,00271	213	0,0639
0,00241	267	0,0803
0,00211	287	0,0864
0,00180	302	0,0907
0,00150	311	0,0935
0,00120	316	0,0949
0,00090	303	0,0912
0,00060	261	0,0786
0,00030	165	0,0496
0,00000	35	
Сумма		0,7291

Таблица 8 - Данные поля скоростей по пути интегрирования (смещение 2R)

Координата, l, м	Скорость, v, м/с	$v*dl, м^2/с$
0,00333	379	0,1403
0,00296	455	0,1685
0,00259	471	0,1744
0,00222	478	0,1771
0,00185	480	0,1776
0,00148	475	0,1760
0,00111	465	0,1721
0,00074	436	0,1613
0,00037	384	0,1422
0,00000	220	
Сумма		1,4895

Таблица 9 - Данные поля скоростей по пути интегрирования (смещение 1,5R)

Координата, l, м	Скорость, v, м/с	$v*dl, м^2/с$
0,00271	295	0,0888
0,00241	359	0,1081
0,00211	394	0,1184
0,00180	415	0,1247
0,00150	433	0,1301
0,00120	433	0,1303
0,00090	410	0,1232
0,00060	322	0,0969
0,00030	124	0,0372
0,00000	69	
Сумма		0,9578

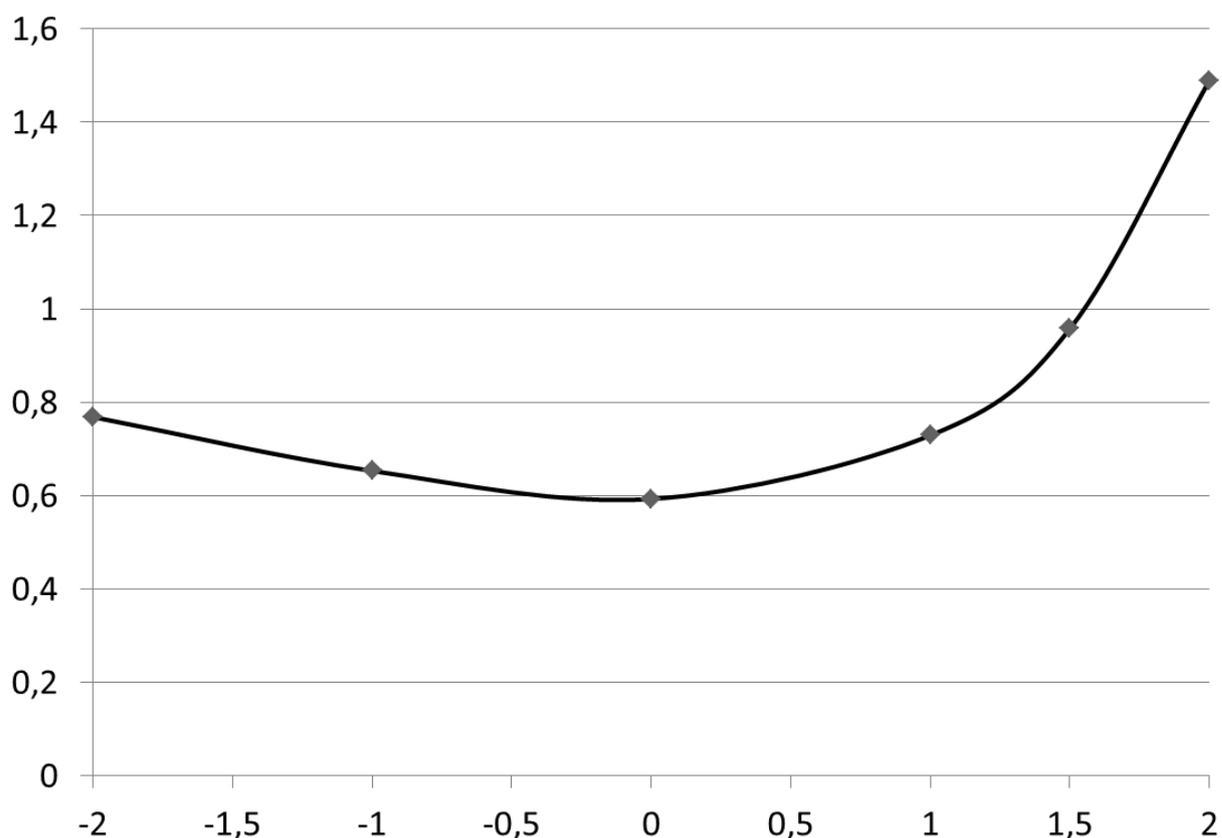


Рисунок 50 - Зависимость суммарной интегральной скорости (м²/с) по пути пробоя от смещения иглы (в радиусах сопла)

Зависимость суммарной интегральной скорости по пути пробоя от смещения иглы рисунок 50 показывает, что наибольшая интегральная скорость имеет место при смещении $+2R$, но учитывая то, что на больших вылетах иглы повышается вероятность пробоя с тела иглы на сопло, целесообразно использовать смещение иглы $+1,5R$, что также обеспечивает достаточно высокую интегральную скорость по пути пробоя.

Выводы по разделу

Задачей второго раздела является исследование газодинамических характеристик сопла установки СЭО методами численного моделирования.

По результатам анализа газодинамических модулей ANSYS Fluent, Chemkin-Pro и CFX в качестве инструмента для проведения исследований выбран модуль Fluent.

При построении модели использована сетка с неравномерным шагом ячеек, что обеспечивает повышение точности газодинамической модели в месте коронного разряда - между иглой и соплом.

По результатам моделирования получены поля скоростей и давлений при истечении воздуха из сопла для различных вариантов геометрии сопла, отличающихся смещением иглы относительно среза сопла.

В качестве критерия оптимальности использована интегральная сумма скоростей по пути от острия иглы до ближайшей точки сопла.

Методами численного моделирования установлены параметры газового течения сопла СЭО при различных смещениях коронирующего электрода (иглы) и определена величина смещения, обеспечивающая повышение переноса модифицированной коронным разрядом воздушной среды в зону резания.

3 Экспериментальная часть

3.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная система состоит из установки подачи сжатого воздуха, высоковольтного источника питания, коронного разрядника (ионизатора) и сопла. Газ, подаваемый сжатым воздухом машины через регулирующий клапан и расходомер, попадает в ионизатор, где происходит коронный разрядник. Энергия обеспечивается высоковольтным источником питания. Генерируемые ионы и озон транспортируются в зону резания путем подачи сжатого воздуха через ионизатор и сопло и играют роль охлаждающей жидкости и смазки. На рисунке 51 показана схема экспериментальной системы.



Рисунок 51 – Схема экспериментальной системы СЭО

На рисунке 52 представлено фото токарного станка с подведенной охлаждающей системой.

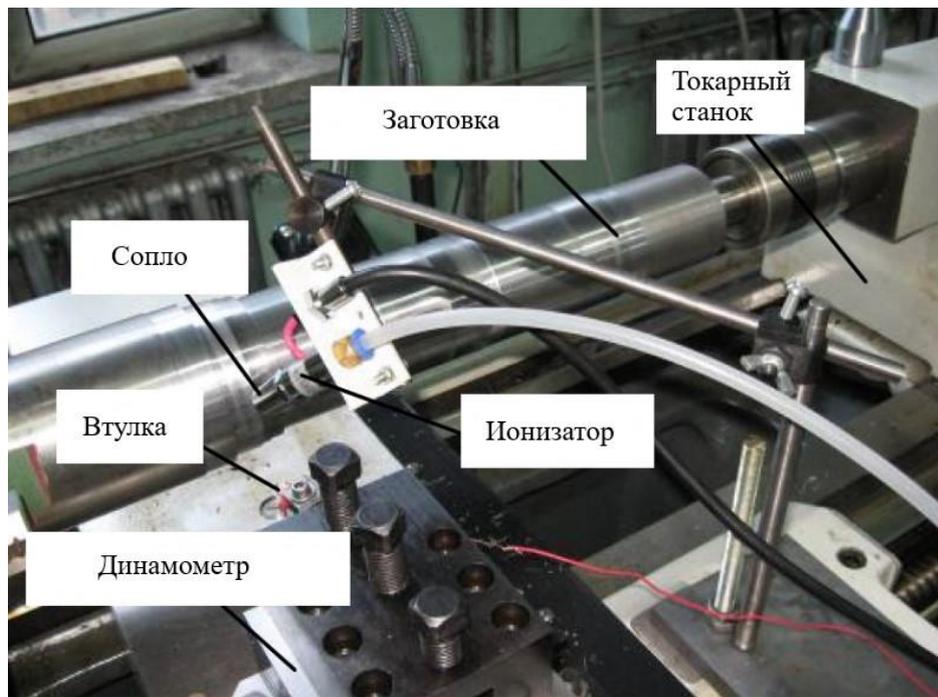


Рисунок 52 – Экспериментальное фото

Экспериментальное исследование предложено однофакторным методом при сухом электростатическом охлаждении и сухой резке. Усилие резания измеряется динамометром Kistler 9257A, а температура резания измеряется термопарой рабочего инструмента и регистратором функций. Эксперимент был установлен на универсальном токарном станке СА6140. Вставки - твердосплавный инструмент P10, а заготовка - сталь AISI1045. Углы инструмента показаны в таблице 1. Сухое электростатическое охлаждение и сухая резка проводились при одинаковых параметрах резания. При применении сухого электростатического охлаждения выходное напряжение высоковольтного источника питания составляло -5 кВ, расстояние между соплом и зоной резания составляло 30 мм, диаметр сопла составлял 3 мм, давление газа составляло 0,2-0,3 МПа и его температура составляет 18.

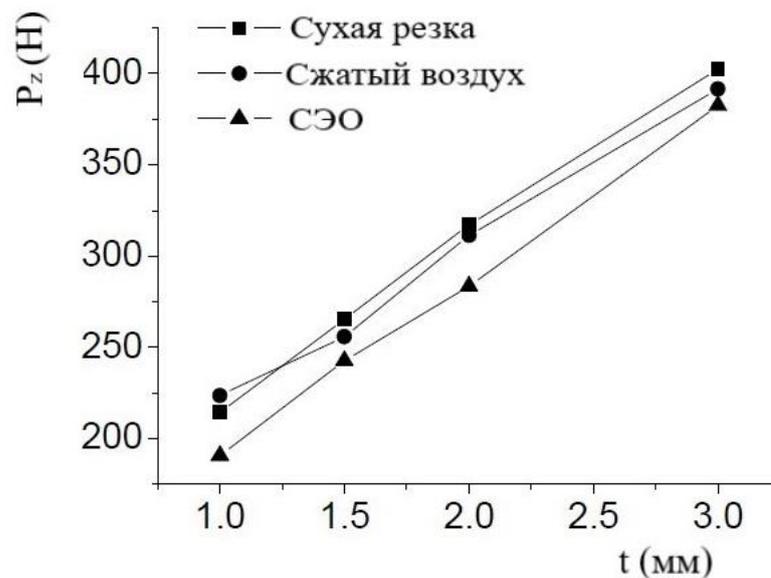
Таблица 10 – Углы инструмента

γ_o	α_o	k_r	k_r'	λ_s
14°	6°	75°	15°	-6°

3.2 Влияние сухого электростатического охлаждения на силу резания

Исследовано влияние подачи и глубины резания на тангенциальную составляющую силы резания P_z .

На рисунках 53, 54 показано изменение силы резания в зависимости от глубины резания и подачи соответственно в указанных условиях. Замечено, что сила резания и сила тяги ниже во время сухого электростатического охлаждения (СЭО) по сравнению с сухой резкой, значения были уменьшены примерно на 8 процентов. Из-за электростатического охлаждения происходит впрыск ионизированного газа с большим количеством ионов и небольшого количества озона, он может легко проникать в границу между стружкой и инструментом, изменять состояние трения и уменьшать силу резания и силу тяги.



$v_c=96,1$ м/мин, $S=0,15$ мм/об

Рисунок 53 – Влияние глубины резания на тангенциальную составляющую силы резания

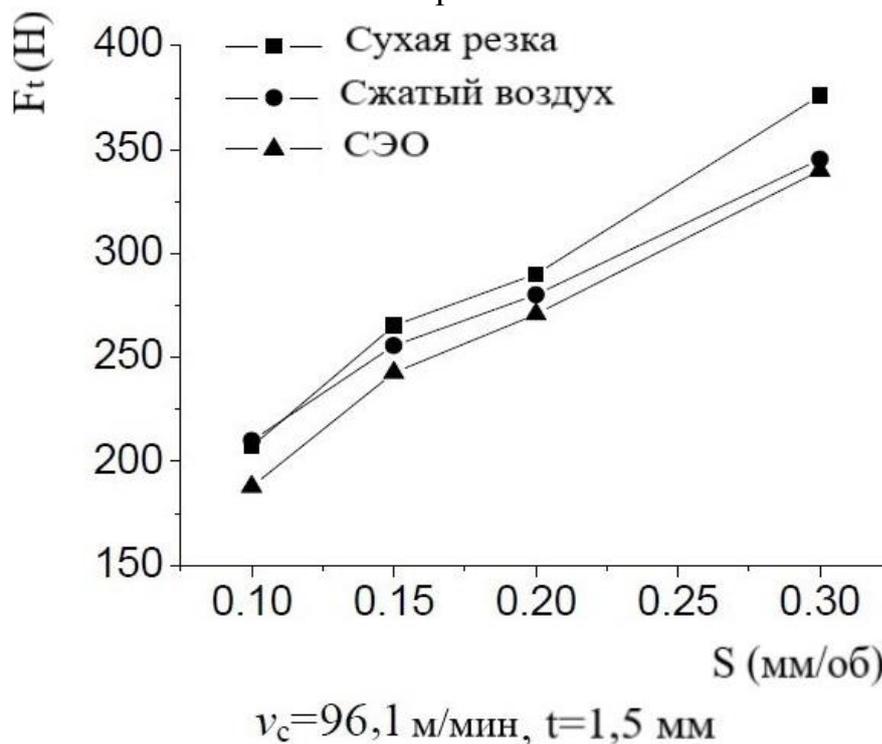


Рисунок 54 – Влияние подачи на тангенциальную составляющую силы резания

3.3 Влияние сухого электростатического охлаждения на коэффициент деформации стружки

Коэффициент деформации стружки предопределяет величину пластической деформации при резании. При большем коэффициенте усадки стружки, больше пластическая деформация. Для различных металлов этот коэффициент колеблется от 1 (при строгании чугуна) до 6 (при обработке пластичных сплавов). По внешнему виду стружки можно судить о величине пластической деформации. В зависимости от условий обработки и механических свойств металла, нарезают слой (стружка). Схема усадки стружки может иметь различный внешний вид. Есть три основных типа стружки: стружка надлома, скалывания и сливную.

Изменение коэффициента деформации стружки при различной глубине резания и подачи показано на рисунках 55, 56. Указано, что более низкий коэффициент деформации стружки при применении сухого электростатического охлаждения по сравнению с сухой резкой. Причина в том, что трение между передним торцом и стружкой уменьшается, угол сдвига увеличивается, а коэффициент деформации стружки уменьшается при сухом электростатическом охлаждении.

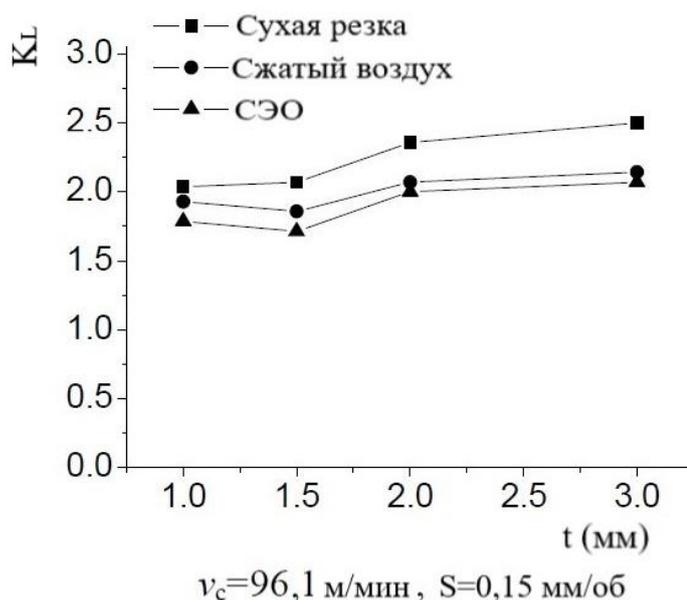


Рисунок 55 – Влияние глубины резания на коэффициент деформации

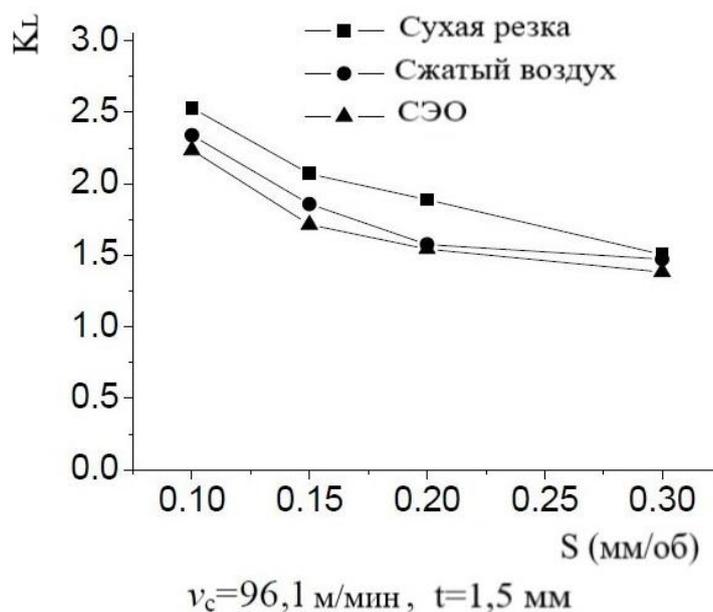


Рисунок 56 –Влияние подачи на коэффициент деформации стружки

3.4 Влияние сухого электростатического охлаждения на температуру резания

Воздействие температуры резания вредно для инструмента и для работы. Основной объем тепла удаляется стружкой, а стружка тем временем обламывается и удаляется из зоны резания. Поэтому следует пытаться убирать все больше и больше тепла при помощи стружки, оставляя небольшое количество тепла, чтобы не повредить инструмент и работу. Возможные вредные воздействия высоких температур резания на режущий инструмент (кромку):

- быстрый износ инструмента, который сокращает срок службы инструмента;
- пластическая деформация режущей кромки;
- термическое отслаивание и разрушение режущих кромок вследствие воздействия тепла;
- строительство кромки.

Во время обработки на месте резания выделяется тепло из трех источников, эти источники вызывают температуру резания:

- первичная зона сдвига, в которой преобразуется большая часть энергии в тепло;
- вторичная зона деформации на поверхности инструмента и стружки, где дальнейшее выделение тепла образуется в результате трения и/или сдвига;
- на боковых поверхностях, которые уже изношенные в результате трения между инструментом и готовой поверхностью.

Выделяемое тепло разделяется между режущим инструментом, стружкой и заготовкой. Распределение этого тепла зависит от конфигурации, размеров и теплопроводность инструмента - рабочего материала и условий резания.

В промежутке от 10 до 20% общего количества тепла уходит в инструмент, а некоторые тепло поглощается заготовкой. С увеличением скорости резания, стружка все больше и больше нагревается.

Температурой резания называется средняя температура на площадках режущего инструмента. Она характеризует уровень нагрева режущего инструмента и существенно влияет на износ инструмента на передней и задней поверхностях. Температура резания может быть определена экспериментально – вследствие измерением.

Методы измерения температуры резания условно подразделяются на прямые и косвенные. Прямые методы включают измерения с использованием различных типов термопар, а косвенные методы включают оценку температуры: в зависимости от цвета стружки; использование термальных красок, которые меняют цвет в зависимости от температуры; путем измерения инфракрасного излучения внешней поверхности микросхемы с помощью фотоэлектрических датчиков и радиационных пирометров; путем измерения микротвердости зоны тепловых превращений в режущем инструменте, происходящих под воздействием высоких температур.

Изменение температуры резания при различной глубине резания и подачи показано на рисунках 57, 58. Наблюдается, что при сухом электростатическом охлаждении возможна более низкая температура резания.

Температура резания была снижена примерно на 10 процентов по сравнению с сухой резкой. С одной стороны, впрыск ионизированного газа и сжатого воздуха увеличивал пропускную способность конвекционного теплообмена, с другой стороны, ионы и озон при сухом электростатическом охлаждении могут легко проникать в поверхность инструментальной оснастки и образовывать смазочную пленку. В результате трение между поверхностью инструмента и стружки уменьшается, и температура резания уменьшается с применением сухого электростатического охлаждения.

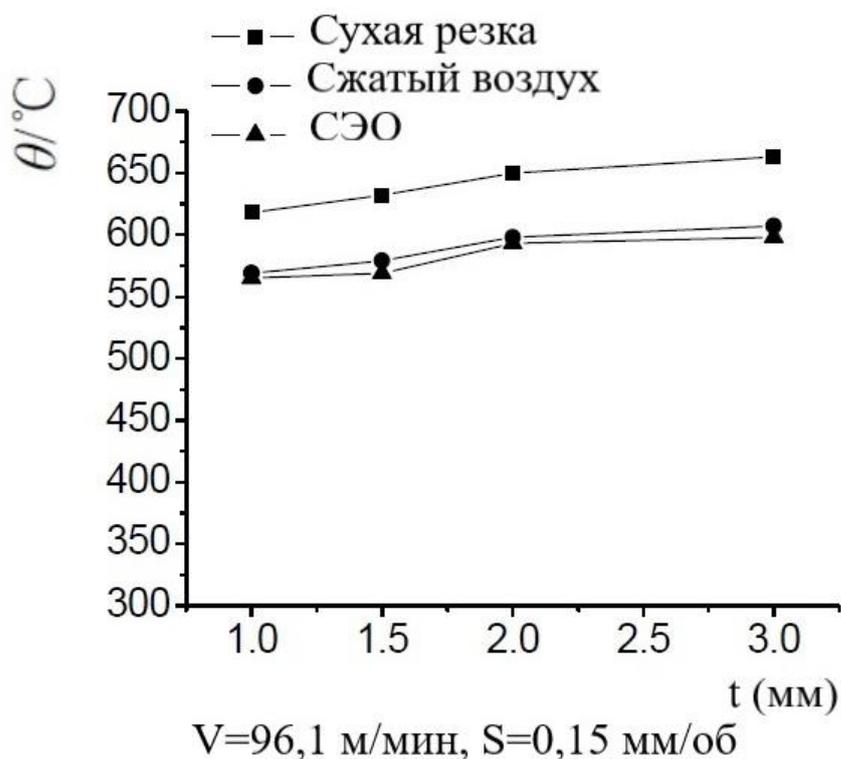


Рисунок 57 –Зависимость температуры от глубины резания

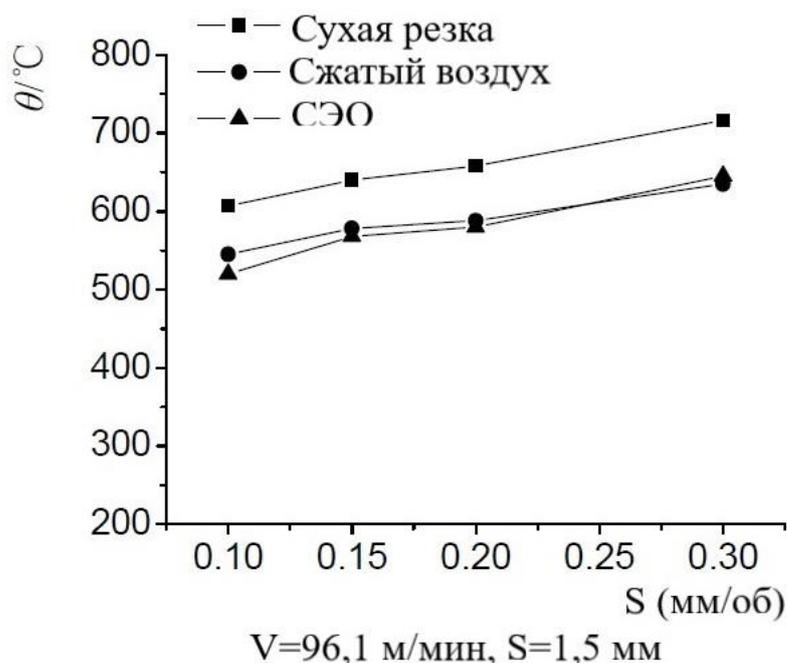


Рисунок 58 –Зависимость температуры резания от подачи

3.5 Влияние сухого электростатического охлаждения на форму стружки

На рисунке 59 показано сравнение форм стружки, полученных на разных подачах при сжатом воздухе, сухой резке и СЭО. Представлено, что стружка легко обрабатывается и более равномерно распределяется при сухом электростатическом охлаждении. Очевидно, что СЭО является преимуществом при формировании оптимальной стружки. В результате сухого электростатического охлаждения стружка обладает способностью уменьшать трение и усилие резания между режущей кромкой инструмента и стружкой. На рисунке 60 показано сравнение цвета стружки, полученного при разных условиях охлаждения:

– оранжевый цвет стружки, при сухом электростатическом охлаждении и сжатом воздухе;

– темно-синий цвет, при сухой резке, это указывает на более высокую температуру резания.

	S=0,3 мм/об	S=0,2 мм/об	S=0,15 мм/об	S=0,1 мм/об
Сухая резка				
Сжатый воздух				
СЭО				

Рисунок 59 – Сравнение форм стружки



Рисунок 60 – Слева - сухая резка, в середине - сжатый воздух, справа – СЭО

3.6 Влияние сухого электростатического охлаждения на износ инструмента

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

На рисунках 61, 62 показано, что граничное значение износа боковой поверхности инструмента VN при резке сталей AISI1045 в разных условиях охлаждения.

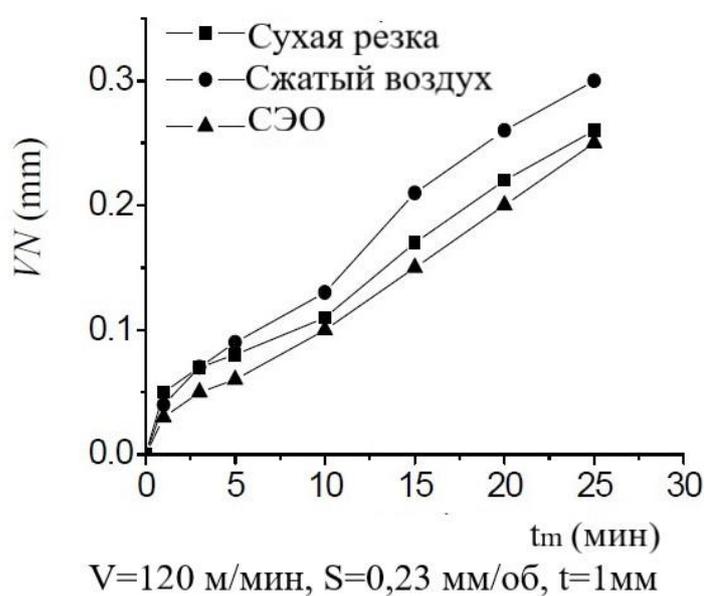


Рисунок 61 –Износа инструмента при $V=120$ м/мин

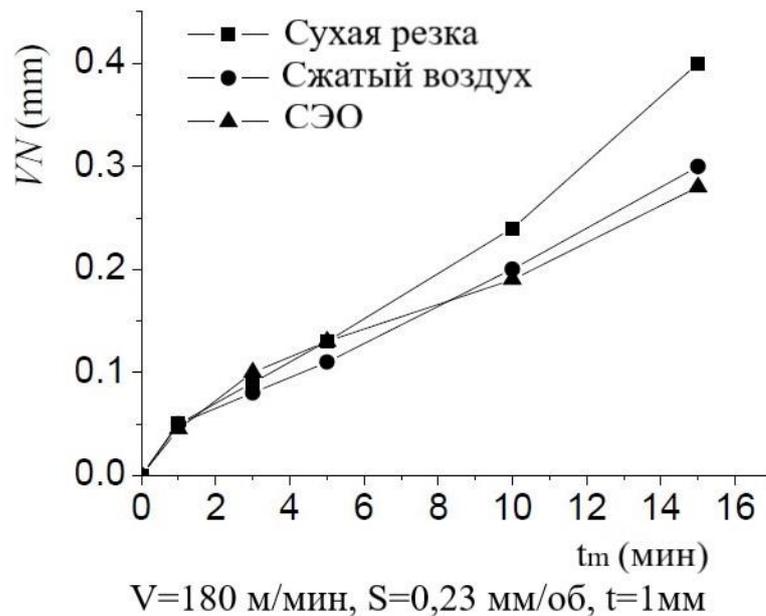


Рисунок 62 –Износа инструмента при $V=180$ м/мин

Это указывало на то, что в трех условиях резания тенденция износа инструмента была постоянной. Износ по бокам инструмента при сухом электростатическом охлаждении носился медленнее, чем при сухой резке. Было уменьшено примерно на 33% и 10% по сравнению с охлаждением сжатым воздухом и сухой резкой соответственно.

Износ режущего инструмента существенно отличается от износа деталей машин, так как зона резания, в которой работает инструмент, характеризуется высокой химической чистотой трущихся поверхностей, высокой температурой и давлением в зоне контакта. Механизм износа инструмента при резке металла сложен и включает абразивный, адгезивный и диффузионный износ. Специфический эффект каждого из них зависит от свойств материала, инструмента и детали, и условий обработки (прежде всего, скорости резания).

Чем выше механические свойства обрабатываемого материала и содержание в нем углерода, хрома, вольфрама, титана, молибдена, тем

интенсивнее износ инструмента. Наибольшее влияние на интенсивность износа оказывает скорость резания, меньшее - подача и глубина резания. Как правило, инструмент изнашивается на задней и передней поверхностях. Критерий износа обычно принимается за допустимый износ задней части инструмента.

Износ режущего инструмента называется истиранием его передней поверхности и образованием на нем отверстия под действием трения стружки и истирания поверхности на заготовке. Скорость износа различна и часто сопровождается выкалыванием твердых сплавов режущего лезвия, а в вязких инструментальных сталях - пластической объемной деформацией. В результате инструмент изнашивается более интенсивно.

Выводы по разделу

Задачей экспериментального исследования было определить эффективность технологии СЭО при точении. Исследовано влияние СЭО на силу резания, коэффициент деформации стружки, температуру резания, форму стружки, износ инструмента.

В ходе экспериментов использована экспериментальная система, состоящая из установки подачи сжатого воздуха, высоковольтного источника питания, коронного разрядника (ионизатора) и сопла.

Результаты экспериментов подтверждают эффективность технологии СЭО, в частности получено снижение силы резания по сравнению с обработкой без охлаждения на 18%, коэффициента усадки стружки на 5%, температуры резания на 10%.

Полученные результаты в целом соответствуют результатам, полученным другими исследователями.

Заключение

СЭО относится к современным технологиям экологически чистого охлаждения при резании.

Многочисленными исследованиями установлена эффективность СЭО с точки зрения стойкости инструмента, силы резания, геометрических параметров обработанной поверхности, таких как точность и шероховатость. Установлено, что СЭО представляет собой экологически безопасный метод охлаждения и превосходит сухую обработку и обработку с жидким охлаждением.

По результатам моделирования получены поля скоростей и давлений при истечении воздуха из сопла для различных вариантов геометрии сопла, отличающихся смещением иглы относительно среза сопла.

В качестве критерия оптимальности использована интегральная сумма скоростей по пути от острия иглы до ближайшей точки сопла.

Методами численного моделирования установлены параметры газового течения сопла СЭО при различных смещениях коронирующего электрода (иглы) и определена величина смещения, обеспечивающая повышение переноса модифицированной коронным разрядом воздушной среды в зону резания.

В ходе экспериментов использована экспериментальная система, состоящая из установки подачи сжатого воздуха, высоковольтного источника питания, коронного разрядника (ионизатора) и сопла.

Результаты экспериментов подтверждают эффективность технологии СЭО, в частности получено снижение силы резания по сравнению с обработкой без охлаждения на 18%, коэффициента усадки стружки на 5%, температуры резания на 10%.

Полученные результаты в целом соответствуют результатам, полученным другими исследователями.

Список используемых источников

1. Абрамович А.В. Газодинамика. М. : Наука. 1973г.
2. Аваков Д. А. Физические основы теории стойкости режущих инструментов М.: Машгиз. 1960. 308 с.
3. Ахметзянов И.Д., Бедункевич В.В. Возможности и условия применения метода сухого электростатического охлаждения при резании металлов. // Электронная обработка материалов. 1991. №5. С. 71-74.
4. Ахметзянов И.Д., Бедункевич В.В., Ильин В.И. Возможности и условия применения метода сухого электростатического охлаждения при резании металлов. // Электронная обработка материалов. 1991. №5. С. 71-74.
5. Ахметзянов И.Д., Ильин В.И., Кирий В.Г. Влияние униполярного коронного разряда на процесс обработки резанием. // Межвуз. сб. Электрофизические процессы в сильных электрических и магнитных полях. Чебоксары, ЧувГУ, 1987, 148 с.
6. Безухов Н.И., Лукин О.В. Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. – М.: Высшая школа, 1974. – 200 с.
7. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. - М.: Машиностроение, 1975.
8. Боровский Г. В. Металлорежущий инструмент из синтетических сверхтвердых материалов: Обзор, информ.- М.: ВНИИТЭМР, 1986.- 48 с.
9. Гордон М. В. Исследование трения и смазок при резании металлов, 2002. С. 7–138.
10. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. -М.: Машгиз, 1955
11. Зорев Н. Н., Бобров В. Ф., Грановский Г. И. и др. Развитие науки о резании металлов / - М.: Машиностроение, 1967.- 416 с.
12. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. – М.: Московский университет, 1978. 287 с.

13. Иотов В.В., Хрипунов Н.В. К вопросу теории сухого электростатического охлаждения режущего инструмента // «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях» - материалы конференции. Киев, 2001г.
14. Исследование метода «сухого» электростатического охлаждения режущего инструмента (СЭО) (Отчет о проведенных испытаниях), ВНИИинструмент, Лобанцова В.С, Ковальский В.М, Москва - 1990
15. Кожуро Л.М. Обработка износостойких покрытий. – Минск. Дизайн ПРО, 1997.-208 с.
16. Кравченко Б.А., Папшев Д. Д., Колесников Б .И. и др. Повышение выносливости и надежности деталей машин и механизмов. Куйбышевское книжн. изд-во, 1966, 222 с.
17. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ: учеб. для вузов / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
18. Кушнер В. С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных металлов. -Иркутск: Иркут. ун-т, 1982.
19. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. – М.: Наука. – 1986. – С. 306-308.
20. Малинин Н.Н. Действительные диаграммы растяжения при высоких температурах. – Известия ВУЗов. Машиностроение, 1968, №1, с.41-46
21. Маталин А.А. Технология механической обработки. – Л.: Машиностроение, 1977. – 464 с.
22. Ногуты Т. Влияние СОЖ на работу резцов из КНБ /Ниппон гаккай ронбюсю. Серия С.-1981.-т.47.-№415.-С. 390-396.
23. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. Том I. – М.: Мир. – 1984. – С. 26-34.

24. Покладий Г.Г. Олейников А.Б. Оценка шероховатости обработанной поверхности газотермических покрытий/ Сверхтвердые материалы 1988, №1
25. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инст-румента. -М.: Машиностроение, 1969.
26. Разработка и внедрение экологически чистого «сухого» электростатического охлаждения взамен масляных СОЖ на операциях обработки зубчатых колес трансмиссии трактора. Технический отчет. Челябинск. ОАО Челябинский тракторный завод, 1996. 19 с.
27. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
28. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
29. Розенберг А. М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. -М.: Машгиз, 1956.
30. Розенберг А. М., Розенберг Ю. А. К вопросу о напряженно-деформи-рованном состоянии металла в процессе резания // Сверхтвердые материалы. -1988, №5, с. 41 - 49
31. Смазочно-охлаждающие средства для обработки металлов резанием: Справочник / С.Г. Энтелис, Э.М. Берлиндер, Л.В. Худобин и др. – М.: Машиностроение, 1986.
32. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
33. Солодихин А.Е. Влияние электрического состояния воздушной среды на процесс точения стали. // Электронная обработка материалов. 1972. №3. С. 15-19.
34. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. - М.: «Машиностроение», 1981. – 184с.

35. Сухановский А.Н. Формирование дифференциального вращения в цилиндрическом слое жидкости// Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 103-115
36. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. -М.: Машиностроение, 1992.
37. Худобин Л В . Котельникова В.И. // Исследование механизма и эффективности термической, ультразвуковой и световой активации смазочно-охлаждающих жидкостей.// Вопросы обработки металлов резанием, Иваново 1975. с. 11-16.
38. Худобин Л.В., Бердичевский Е. Г. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке. М.: Машиностроение, 1977.-190с.
39. Худобин Л.В., Булыжев Е.М. Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке. М.: Машиностроение, 2004, - 352 с.
40. Худобин Л.В., Булыжев Е.М., Ромашкин В.Г. Безотходное оборотное ресурсосберегающее применение СОЖ в машиностроении // Процессы абразивной обработки. Абразивный инструмент и материалы. Волжский инж. – стр. инс-т. , 1997.- с 144-146.
41. Худобин Л.В., Жданов В.Ф. О возможности активации СОЖ импульсными электрическими полями //Физика, химия, механика процесса трения. Иваново, 1977, с. 60-62.
42. Худобин Л.В., Жданов В.Ф. О возможности активации СОЖ импульсными электрическими полями //Чистовая обработка деталей машин-Саратов;СПИ, 1980.-С. 49-53.
43. Sujan Debnath, Moola Mohan Reddy, Qua Sok Yi. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. 44.Journal of cleaner production; 2014, 83: 33-47.
45. Ahmad Zubair Sultan, Safian Sharif, Denni Kurniawan Electrostatic Cooling System as Environmentally Conscious Cooling Technique: A Review on Its Potentials for Machining Processes/12 July 2012.

46. Liu Xin & Xu Wen & Sun Jing. (2011). Experimental Research on the Dry Electrostatic Cooling Assisted Machining for Hardened Steel. *Advanced Materials Research*. 189-193. 3026-3030. 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3026.
47. Wang Hui & Ji Xiulin & Ni Fusheng. (2016). Experimental Study on Dry Electrostatic Cooling in Turning. 10.2991/icmemtc-16.2016.279.
48. Wang Hui & Han Rong & Wang Yang. (2010). Tool Wear Investigation on Dry Electrostatic Cooling in Turning Titanium Alloy Ti6Al4V. *Advanced Materials Research*. 97-101. 2058-2061. 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.2058.
49. Sultan A.Z. & Sharif Safian & Kurniawan Denni. (2012). Electrostatic Cooling System as Environmentally Conscious Cooling Technique: A Review on Its Potentials for Machining Processes.