

При дополнительном исследовании механических и физико-химических методов обработки керамики можно составить качественные модели поврежденности материала, которые позволят рационально подбирать режимы обработки и тем самым увеличивать долговечность деталей и надежность конструкции в целом.

#### Литература

1. The nature of machining damage in brittle materials / D.B. Marchall, A.G. Evans, B.T. Khuri – Yakub etal // Pros. Poyol. Soc (London) Ser.A. – 1983. – v385, № 1789. p-461 -475
2. Marsh D.M. Stress concentrations a crystal surfaces and the embrittlement of sodium chloride // Phil. Mag. – 1960 v 5, №58, P1197 – 1199
3. Gielisse P.I., Stanislaio I., Mechanical methodis of ceramic finishing // NBS, 1972 № 348 – Spec. publ. – p5 – 35
4. Томимори Х. Шлифование тонкой керамики // Кикай Гидзюцу – 1984 Т.32. №2 – с. 36 - 40
5. Ито С. Прецизионное шлифование тонкой керамики // Кикай Токогу, - 1983. – Т.27, №6. с. 36 – 40
6. Allor R.L., Govila R.K., Whalen T.I. Influence of Strength Properties of Turbine Materials. Engineering and Research staff, Ford Motor Go Deaborn, M14821. Ceramic Proceedings, 1982 v 3, №7/8 pp 392 – 404
7. Обоснование методики входного неразрушающего контроля. Технический отчет УДК 620 179. 16: 621. 039 МИФИ 1991 г.
8. Горелов В.А. Разработка методов и средств эффективного выбора режимов резания труднообрабатываемых материалов на основе термосиловых характеристик процессов. Диссертация д.т.н.: 05.03.01 – Москва, 2007. 384 с.

#### ***К вопросу выбора технологии обработки сложнопрофильных изделий (на примере лопаток моноколес газотурбинных двигателей)***

д.т.н. Горелов В.А., Аршинов С.В., д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.т.н. доц. Пини Б.Е.,  
к.т.н. доц. Бекаев А.А., к.т.н. доц. Мерзликин В.Г., Второва А.Ю.  
ФГУП «НПП газотурбостроения «САЛЮТ», Университет машиностроения  
[bekaev@list.ru](mailto:bekaev@list.ru)

*Аннотация.* В работе рассмотрен промышленный опыт обработки лопаток моноколес газотурбинных двигателей, проанализированы характеристики, достоинства и недостатки известных способов обработки, сделан вывод о направлении проведения дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* лопатка моноколеса, сложнопрофильное изделие, фрезерование на многокоординатных станках с ЧПУ, газотурбинные двигатели.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г.г. по мероприятию программы 1.2.1 (Госконтракт №16.740.11.0439 от 26 ноября 2010 г.).

В современном авиадвигателестроении важнейшей задачей является повышение качества и точности производства сложнопрофильных деталей, к каким относятся лопатки одно- и многоступенчатых компрессоров и турбин, определяющих параметры воздушного потока в газотурбинных двигателях (ГТД).

Разработка новых и усовершенствование существующих конструктивно-технологических решений для изготовления лопаток ГТД является главной задачей газотурбостроения. Основные требования, предъявляемые к современным конструкциям ГТД, направлены на увеличение удельных параметров ГТД, обеспечение компактности их конструкций (снижение количества ступеней, деталей, массы и размеров), улучшение эксплуатационной технологичности (упрощение конструкции, повышение надежности и ресурса работы) и снижение трудоемкости их изготовления.

Для новых поколений ГТД характерным является замена (как в отечественной, так и в

зарубежной практике) традиционно используемых сборных дисков, оснащенных лопатками с замковой частью, на моноколеса блиски (от английского blisk (bladed disk)) или аналогичные бездисковые кольцевые конструкции блинги (от английского bling (bladed ring)) с целью обеспечения требований, предъявляемых к современным ГТД [1-6 и др.].

В настоящее время отечественными и зарубежными авиадвигателестроителями освоены несколько способов обработки разноразмерных лопаток блисков и блингов моноколес, основными из которых являются гидроабразивная, электрохимическая, электроэрозионная обработки и обработка фрезеровыванием на станках с ЧПУ.

Сделать обоснованный выбор той или иной технологии изготовления труднообрабатываемого материала лопатки (как правило, из титанового сплава) можно на основании сравнения характеристик, достоинств и недостатков вышеуказанных методов обработки, более подробно рассмотренных ниже.

### Гидроабразивная обработка

К этому способу обработки относится струйная резка под действием струи высокого давления чистой воды или струи воды, смешанной с абразивом (гидроабразивная обработка – ГАО).

На сегодняшний день технология ГАО является одной из наиболее эффективных, гибких, экологически чистых и энергосберегающих технологий обработки, применяемой для раскрытия листового материала, прорезки пазов и окон, прошивки отверстий и зачистки наружных и внутренних поверхностей, в том числе и в труднодоступных местах изделий сложного профиля, маркировки и гравирования [7, 8 и др.].

ГАО используется во многих отраслях промышленности включая аэрокосмический комплекс, в том числе и для деталей из труднообрабатываемых материалов, к которым относятся и моноколеса.

При гидроабразивной обработке (рисунок 1) в водоструйных установках насосом высокого давления создается высокое давление воды до 6000 бар (насосом типа *HyperJet* фирмы *Flow*), которое преобразуется в кинетическую энергию струи, вытекающую через смесительные трубки с сапфировым или алмазным соплами с диаметром проходного сечения от 0,08 до 1,2 мм при скорости струи более 3500 км/ч.

Полученная таким образом форма струи имеет вид идеального точечного инструмента, что дает возможность обрабатывать изделия сложного профиля практически с любым радиусом закругления (минимальный радиус скругления будет равен радиусу струи).



Рисунок 1 – Общий вид процесса гидроабразивной обработки

При гидроабразивной обработке в струю воды добавляют абразив (песок), что позволяет снизить отходы материалов по сравнению с традиционными способами в 15-20 раз. Силы резания в процессе обработки не превышают 100 Н, что исключает деформацию материала в прилегающей к зоне резания области.

К основным преимуществам ГАО следует отнести: широкий диапазон обрабатываемых материалов; хорошее качество получаемой поверхности (шероховатость поверхности  $Ra = 3,2 \dots 6,3 \mu\text{м}$ , точность линейного позиционирования  $\pm 0,05 / 500 \text{мм}$ ), высокую скорость обработки (до  $25 \text{ м/мин}$ ) при резке по контуру; отсутствие нагрева обрабатываемого материала в процессе обработки (при обработке материал сохраняет комнатную температуру), что позволяет эффективно обрабатывать как твердые материалы, так и материалы с низкой температурой плавления; экологическая чистота процесса (не образуются вредные вещества), уровень шума находится в пределах от  $85$  до  $95 \text{ дБ}$ ; отсутствует необходимость в применении специальных конструкций инструментов для различных операций ГАО (резка, прошивка отверстий, вырезка окон, образование пазов и щелей выполняется одним и тем же инструментом – головкой для ГАО, которая может быть установлена в различные положения).

Основными недостатками ГАО являются: сравнительно малый срок службы смесительных трубок и сопел (до  $50$  часов работы); необходимость в специальном оборудовании, сложность его ремонта и обслуживания (ремонт и текущее обслуживание необходимо производить через каждые  $300 \dots 500$  часов работы); сложность управления обработкой вследствие проявления эффекта «заноса» гидроабразивной струи с величиной отклонения струи от вертикали  $\Delta$  (рисунок 2), обусловленного спецификой взаимодействия струи и обрабатываемого материала и зависящей от толщины обрабатываемой детали.

Вследствие последнего недостатка данный метод нашел применение для предварительного удаления металла из межлопаточных каналов, реже – для чистовой обработки лопаток сложнопрофильных моноколес, имеющих двойную кривизну.

На ведущем машиностроительном предприятии России ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ» была проведена работа по оценке целесообразности внедрения ГАО для предварительной обработки межлопаточных каналов моноколес взамен существующей черновой обработки фрезерованием на многокоординатных станках с ЧПУ [1]. Результаты сравнений технико-экономических показателей показали, что внедрение технологии ГАО в производство является экономически нецелесообразным, конечно, за исключением только тех случаев, когда данный метод является единственно возможным, что является крайне редким явлением.



**Рисунок 2 – Проявление эффекта «заноса» гидроабразивной струи**

### **Электрохимическая обработка**

В настоящее время одним из наиболее часто используемых методов чистовой обработки при производстве моноколес является электрохимическая обработка (ЭХО), заключающаяся в растворении металла в электролите под воздействием электрического тока.

Использование ЭХО позволяет получать лопатки малой толщины с минимальными радиусами кромок  $\approx 0,04 \text{мм}$  исключая дальнейшую ручную полировку (предварительная обработка с удалением значительных масс металла в межлопаточных каналах выполняется либо фрезерованием, либо гидроабразивным методом).

Ввиду отсутствия силового воздействия на деталь при ЭХО в ее поверхностном слое не создаются какие-либо дополнительные напряжения, что позволяет подготовить поверхности лопаток к дальнейшим операциям упрочнения и/или покрытия [9 и др.].

Экспериментальные исследования, проведенные на предприятии (ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ»), показали, что реализация технологии ЭХО (рисунки 3 и 4) моно-

колес сопряжена с рядом проблем, главным образом, связанных с выбором необходимого электролита (выбор ограничен достаточно узким перечнем водных растворов галоидных и азотнокислых солей) и подбором технологических режимов обработки (температура электролита, плотность тока, межэлектродный зазор и др.).

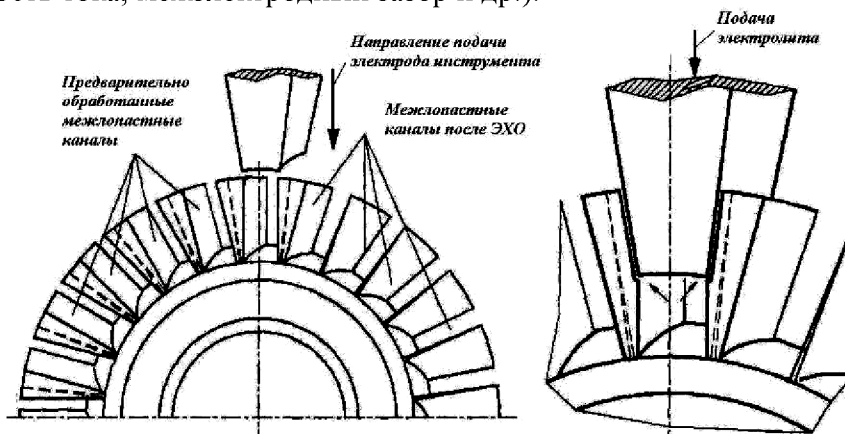


Рисунок 3 – Схема формирования межлопастного канала моноколеса методом ЭХО одним электродом для одновременной обработки поверхностей двух лопаток

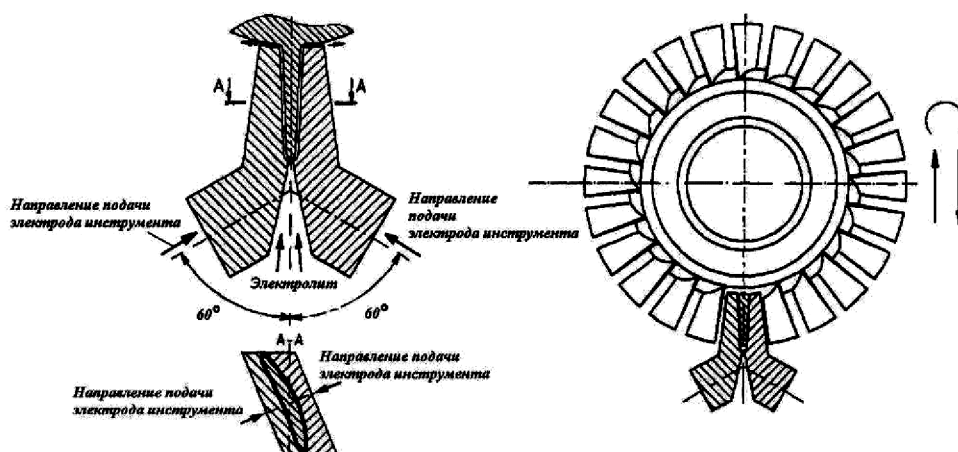


Рисунок 4 – Схема формирования лопатки моноколеса методом ЭХО с использованием двух электродов для одновременной обработки одной лопатки

Другой проблемой реализации метода ЭХО является отсутствие современного отечественного оборудования для финишной обработки лопаток моноколес, а зарубежные электролитические установки (фирмы Winboro Group, Leistritz и др.) имеют высокую стоимость.

#### Электроэрозионная обработка

С повышением степени сложности основных элементов ГТД (применение поверхностей двойной кривизны, использование ажурных тонкостенных и пустотелых элементов конструкций и т.д.) также повышают требования к качеству и точности изготавливаемых деталей.

При обработке подобных деталей все более широкое применение находят физико-химические методы обработки, в частности – электроэрозионная обработка (ЭЭО), что обусловлено следующими причинами: физико-механические свойства современных конструкционных жаропрочных материалов приближаются к свойствам инструментальных материалов, а стойкость режущего инструмента, обрабатывающего детали из этих материалов, мала; возможность получения элементов конструкций ГТД, которые невозможно получить другими методами обработки (например, перфорированные детали).

Современное состояние и технический уровень ЭЭО позволяют в настоящее время ставить и эффективно решать широкий круг технологических задач, таких как изготовление моноколес с малыми межлопаточными каналами методом электроэрозии (рисунки 5 и 6).

К основным достоинствам этого способа обработки можно отнести [10]: возможность

обработки любых токопроводящих материалов независимо от их физико-химических свойств, твердости, вязкости и хрупкости; отпадает необходимость в использовании режущего инструмента или абразива с более высокими механическими характеристиками, чем у обрабатываемых материалов; обеспечивается обработка заготовки одновременно по всей сложной поверхности с минимальной шириной реза за счет простого поступательного перемещения электрода-инструмента, имеющего на торце необходимый профиль обрабатываемой поверхности (при этом один и тот же инструмент может быть использован как для чистовых, так и для черновых операций); появляется возможность обработки глубоких отверстий и щелей, в том числе с переменным сечением по оси; технологические операции практически выполняются без силового воздействия инструмента на заготовку, что позволяет обрабатывать поверхности нежестких и тонкостенных деталей; обеспечивается возможность одновременного обслуживания одним оператором нескольких станков, так как электроэрозионные станки, как правило, являются станками-полуавтоматами и автоматами; появляется возможность автоматизации.

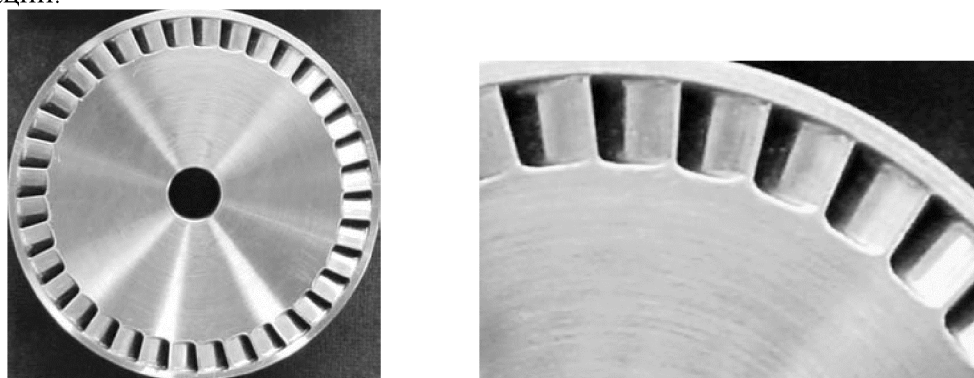


Рисунок 5 – Моноколесо с межлопаточными каналами, полученными методом ЭЭО

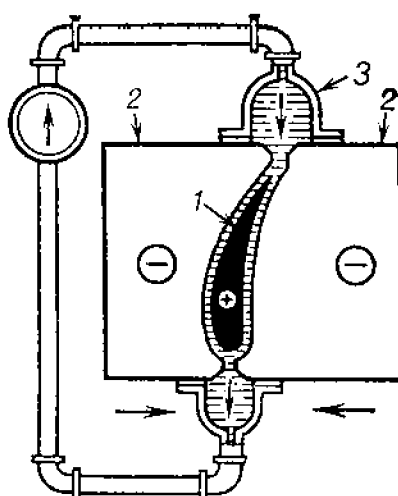


Рисунок 6 – Схема процесса обработки лопатки ГТД методом ЭЭО:  
1 – обрабатываемая лопатка ГТД; 2 – электроды; 3 – электролит

Одновременно с отмеченными достоинствами метод ЭЭО имеет некоторые недостатки. Так, при обработке деталей на чистовых режимах производительность обработки невысока, и в этом случае имеет место большой удельный расход электроэнергии; возникает необходимость в применении рабочей жидкости с высокими диэлектрическими свойствами; усложняется конструкция станка и затрудняется его обслуживание. Точность обработки и чистота обработанной поверхности при ЭЭО зависят от многих факторов, учет которых не всегда возможен. В процессе обработки электрод-инструмент значительно изнашивается, а аналитических зависимостей, учитывающих все многообразие факторов для расчета размеров при ЭЭО, пока не получено [10, 11 и др.].

#### Фрезерная обработка

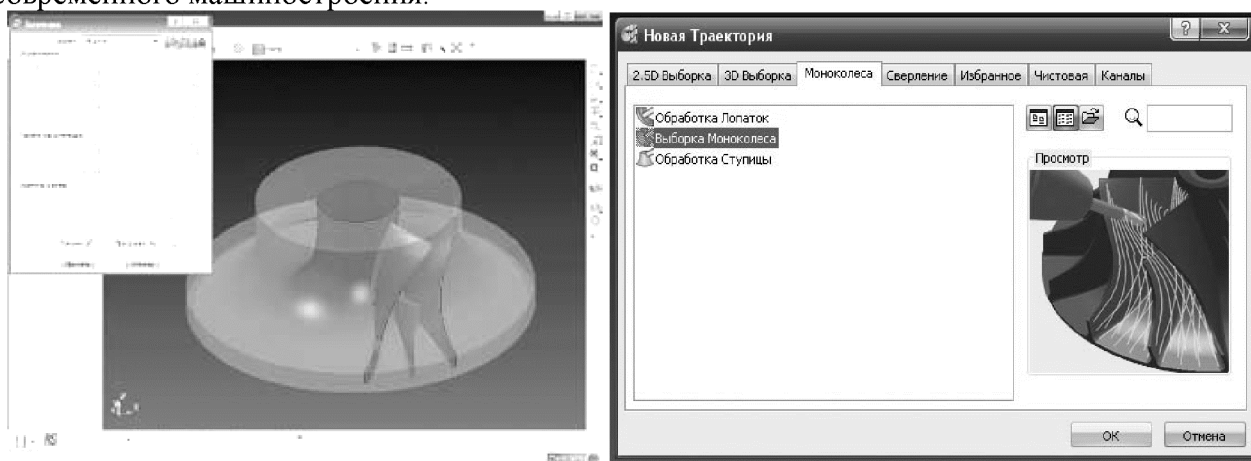
В мировой практике фрезерование блисков и блингов моноколес является традицион-

ным способом их получения и может быть применено на всех этапах их изготовления (черновая, получистовая и чистовая обработка) с использованием многокоординатных фрезерных станков с ЧПУ. Так, типовая технология обработки моноколес фрезерованием включает следующую последовательность операций: черновая выборка межлопаточного пространства; получистовая обработка профиля пера лопатки; чистовая обработка профиля пера лопатки; чистовая обработка ступицы; чистовая обработка радиуса сопряжения ступицы и пера лопатки.

Однако, как показывает практика [1-6 и др.], моноколеса из высокопрочных сталей и никелевых сплавов получать фрезерованием неэффективно вследствие низкой обрабатываемости этих материалов. Кроме того, этим способом невозможно получить очень тонкие и длинные лопатки, так как под действием возникающих усилий резания происходит отжим лопатки и, как следствие, снижение качества и точности обработки.

Для решения этих проблем большинство исследователей [12 и др.] предлагают различные рекомендации и мероприятия, суть которых сводится к созданию математической модели изделия (3-D матмодель моноколеса с лопатками); подготовке управляющей программы обработки (УП); проведению визуализации обработки и отработке УП на возможные ошибки (рисунок 7); выполнению обработки фрезерованием на многокоординатных фрезерных обрабатывающих центрах; проведению контроля профиля обработанной лопатки и ступицы на контрольно-измерительной машине; выполнению полирования поверхности.

Следует отметить, что указанные рекомендации достаточно хорошо известны и уже используются на ведущих предприятиях авиадвигателестроения, однако задача обеспечения требуемого качества и повышение точности обработки является одной из актуальных задач современного машиностроения.



**Рисунок 7 – 3-D матмодель моноколеса и выполнение визуализации обработки**

По мнению авторов работы, решение данной проблемы должно иметь иной подход, суть которого сводится к определению влияния динамических факторов (по степени их воздействия), возникающих в процессе обработки на получаемое качество и точность обработки и разработке рекомендаций по устранению негативного влияния доминирующего фактора. Данное решение невозможно без исследований процесса фрезерования, в частности специфики фрезерной обработки моноколес с помощью математического моделирования.

Авторами работы разрабатывается, так называемая обобщенная математическая модель процесса фрезерования, включающая в себя матмодель процесса формообразования с учетом упругих отжати технологической системы и матмодель ее динамической устойчивости, что позволит спрогнозировать, а значит, и управлять получаемым качеством и точностью обработки.

### Литература

1. Интернет-ресурс: <http://salut.ru/>
2. Интернет-ресурс: <http://www.avid.ru/>
3. Интернет-ресурс: <http://www.npo-saturn.ru/?sat=49>
4. Интернет-ресурс: <http://www.boeing.com/companyoffices/aboutus/brief.html>



5. Интернет-ресурс: <http://www.pw.utc.com/>
6. Интернет-ресурс: <http://www.snecma.com/>
7. Интернет-ресурс: [http://waterjet.bystronic.com/landing\\_pages/waterjet/index.php](http://waterjet.bystronic.com/landing_pages/waterjet/index.php)
8. Интернет-ресурс: <http://www.aquarezka.ru/>
9. Интернет-ресурс: <http://www.indec-ecm.com/technologists/spectrum/>
10. Интернет-ресурс: [http://www.equipnet.ru/articles/hi-tech/hi-tech\\_408.html](http://www.equipnet.ru/articles/hi-tech/hi-tech_408.html)
11. Интернет-ресурс: <http://bashman.ru/ucheba/student/himiya/1578-dostoinstva-i-nedostatki-elektroerozionnoy-obrabotki.html>
12. Интернет-ресурс: <http://www.compress.ru/article.aspx?id=20872>
13. Моргунов Ю.А., Саушкин Г.Б., Вилигданов Т.В. Электрохимическое гравирование аэродинамических занижений в оснастке с проточным каналом. «Металлообработка», 2010, № 2, с. 70-75.
14. Моргунов Ю.А., Саушкин С.Б. Структурное моделирование и классификация способов электрохимической размерной обработки. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2011, № 1, 184-188с.

### **Электромагнитное поле гибридного автомобиля**

д.т.н. проф. Графкина М.В., д.т.н. проф. Нюнин Б.Н., Теряева Е.П.

*Университет машиностроения*

8 (495) 223-05-23 доб. 1313, [eco@mami.ru](mailto:eco@mami.ru)

*Аннотация.* Анализ и оценка источников электромагнитного поля автомобиля позволит решать принципиально новые задачи по снижению негативного воздействия этих полей на человека и окружающую среду.

*Ключевые слова:* автомобильный транспорт, электромагнитные поля, ближняя и дальняя зона электромагнитного поля

Современный автомобиль является, с одной стороны, одним из достижений научно – технического прогресса, который делает человека более мобильным и обеспечивает комфорт передвижения, а с другой – оказывает серьезное негативное воздействие как на окружающую среду, так и на человека. Сегодня принято оценивать экологичность автомобиля по уровню шума и содержанию вредных веществ в отработавших газах и воздействию этих выбросов на атмосферу. Однако увеличение количества и мощности электрооборудования автомобилей, а также появление на городских автодорогах гибридных автомобилей приводит к появлению еще одного значимого фактора негативного воздействия – электромагнитного поля. В свете ухудшения электромагнитной обстановки урбанизированных территорий проблема исследования внутренних и внешних электромагнитных полей автомобиля становится весьма актуальной.

По литературным данным [1] процент электромагнитного загрязнения городской среды от автотранспорта составляет 18-32%. Проведены исследования показателей электромагнитного поля вдоль городской автомобильной дороги в зависимости от интенсивности дорожного движения. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Полученные результаты показывают, что в низкочастотном диапазоне (5 Гц – 2кГц) показатели электромагнитного поля возрастают с ростом интенсивности движения на дороге, в частотном диапазоне 2 кГц – 400 кГц не прослеживается явная зависимость магнитной индукции и напряженности электрического поля от интенсивности.

Проведен анализ частотного диапазона электрооборудования современных автомобилей [1]. Частотные характеристики электрооборудования автомобиля представлены в таблице 2.

Как видно из приведенных данных, автомобильный транспорт и его оборудование являются источниками электромагнитного поля как в низкочастотном, так и в радиочастотном диапазонах и вносят свой вклад в формирование электромагнитной среды обитания. На сегодняшний день практически все исследования электромагнитных полей автомобиля направле-