

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

А. Ф. Кокорин

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия*

Стенд представляет собой комбинацию плазмотрона и аэродинамического устройства для формирования газового потока заданных параметров. В плазмотроне для разогрева газа используется высокочастотный дуговой (ВЧД) газовый разряд. Этот разряд устойчив в широком диапазоне давлений и скоростей газового потока. Используется высоковольтная слаботочная форма ВЧД разряда, с малой эрозией электродов и малой степенью загрязнения газового потока. Питается плазмотрон от лампового ВЧ генератора с рабочей частотой 13,56 МГц и выходной мощностью до 50 кВт. Аэродинамическая часть построена на основе сменных геометрических сопел (сопла Лавалья), устанавливаемых в зависимости от требуемых параметров потока.

Ключевые слова: теплозащитные материалы; плазма; газ; дуговой разряд.

Стенд предназначен для изучения поведения теплозащитных материалов и покрытий в условиях набегающих высокоскоростных высокотемпературных газовых потоков.

Начало подобным исследованиям было положено в 70-х гг. прошлого века потребностями предприятий, разрабатывавших ракетную технику специального назначения. Именно в 70-х гг. на кафедре ЭФ появились первые хозяйственные работы с предприятиями. Один из первых договоров на кафедре появился у Виктора Селиверстовича Перетягина, доцента, к. т. н., пришедшего на кафедру ЭФ физтеха с электрофака. Придя на физтех, он освоил вопросы теоретической физики, связанные с физикой плазмы. Первый хозяйственный договор, за который взялся В. С. Перетягин, был связан с расчетом состава плазмы, образующейся при обтекании тела сверхзвуковым потоком газа. Тематика работы была связана с задачами ОКБ Л. В. Люльева машиностроительного завода им. М. И. Калинина (ЗИК).

Проведенные теоретические исследования необходимо было подтвердить экспериментальными проверками. Возникла идея создать собственный испытательный стенд. В 1970 г. В. С. Перетягин совместно с выпускником кафедры В. Н. Маховым представил доклад на III научно-технической конференции УПИ «Трехфазный высокочастотный генератор», который задумывался как энергетический источник для испытательного стенда по физике плазмы.

В апреле 1970 г. на кафедре приступили к работе под руководством В. С. Перетягина по созданию стенда. Первый опыт по созданию установки для ускорения плазменных потоков был реализован в кабинете Ф364, рядом с учебной лабораторией технической электроники (к. Ф366). Это была маломощная версия, но с реализацией основных идей, которые затем использовались в более мощной установке.

В группе по физике плазмы было два человека: В. С. Перетягин, руководитель и идейный вдохновитель, и А. Ф. Кокорин, технический исполнитель, вначале на должности инженера циклотрона (спасибо Ф. Ф. Гаврилову, выделил ставку), а в конце 1970 г. – ассистента кафедры. В последующие годы к ним присоединились студенты старших курсов кафедры. Это Николай Ковков, Валерий Пышный, Сергей Горинский, Александр Быков и др.

Первоначально в основе стенда лежал плазменный генератор на принципах использовании факельного вида газового разряда. Плазмотроны этого типа активно разрабатывались в Томском политехническом институте, в научной группе профессора И. А. Тихомирова. Но подобный тип разряда позволял получать сильно неравновесную плазму низкой плотности и с малым уровнем энтальпии. Для задач изучения состава плазмы, образующейся при обтекании тела сверхзвуковым потоком газа, и материаловедческих испытаний высокотемпературных огнестойких материалов потребовалось перейти к установкам, позволяющим получать газовые потоки с высоким уровнем энтальпии и высоким уровнем давления газа [1].

В 1975 г. была предложена и отработана конструкция плазмотрона на основе использования высокочастотного дугового (ВЧД) газового разряда. Подобного рода плазмотрон большой мощности был разработан и реализован на кафедре ЭФ впервые в России [2]. Рассматриваемый в данной работе испытательный стенд и представляет собой комбинацию разработанного высокочастотного дугового плазмотрона и аэродинамического устройства для формирования газового потока заданных параметров. Схема испытательного стенда представлена на рис. 1.

Основное назначение плазмотрона — высокоэффективное преобразование электрической энергии в тепловую энергию. Это устройство позволяет получать и стационарно удерживать низкотемпературную плазму, т. е. газ, нагретый до температуры от $3 \cdot 10^3$ до $50 \cdot 10^3$ К.

К настоящему времени разработано большое количество конструкций плазмотронов. В основе большинства плазмотронов лежит использование электрического разряда в виде стабилизированной дуги, которая является эффективным средством в организации высокотемпературных процессов.

Выбор той или иной схемы определяется:

- потребной температурой (энтальпией) газа, зависящей от назначения плазмотрона;
- заданной мощностью дуги;
- требованиями к степени эффективности преобразования электрической энергии дуги в тепловую энергию нагреваемого газа;
- родом газа;
- допустимым ресурсом работы электродов или степенью чистоты генерируемого газа;
- требуемыми параметрами источника питания.

Из требований к параметрам, которые должен обеспечивать испытательный стенд, вытекают требования к разряду, в котором происходит разогрев рабочего газа. И основное требование состоит в обеспечении необходимой энтальпии газового потока. Для обеспечения максимальной энтальпии на уровне 8 МДж/кг (для газа – воздух) температура на оси разряда должна быть не ниже $(6 \div 7) 10^3$ К. При этом разряд должен быть устойчив к срыву при давлении до $3 \cdot 10^6$ Па и расходе газа до 15 – 20 г/с.

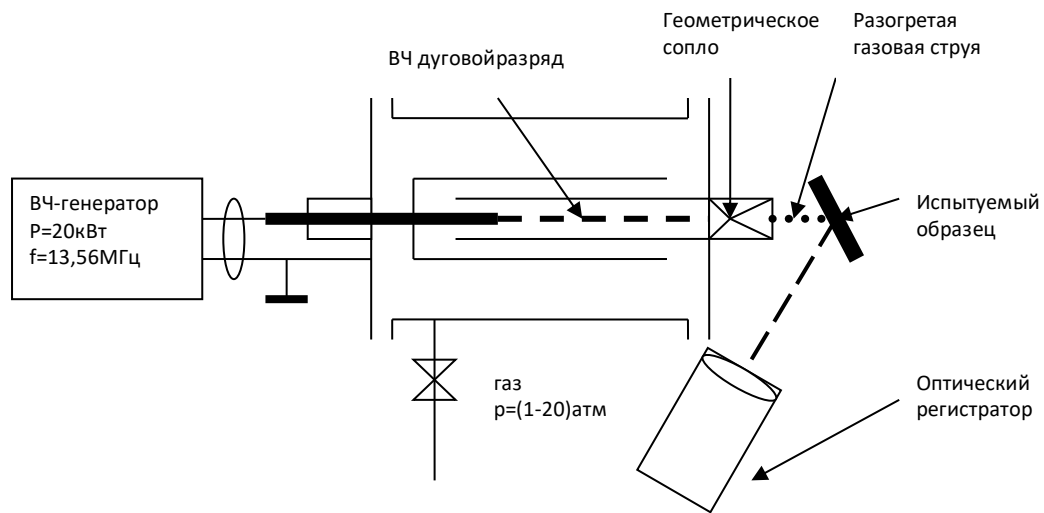


Рис. 1. Схема испытательного стенда

Как отмечено выше, в испытательном стенде использован плазмотрон на основе ВЧ дугового разряда. ВЧД разряд сочетает в себе достоинства как электродных дуговых разрядов постоянного тока, так и высокочастотных разрядов. Этот тип разряда позволяет производить разогрев газов различного рода в широком диапазоне давлений (до 10^7 Па) и расходов газового потока (до 20 г/с при активной мощности, вкладываемой в разряд 40 кВт). При этом сохраняется высокий энергетический КПД (до 70–80 %) [2]. ВЧД разряд устойчив к срыву, имеет стабильные параметры выходного газового потока. Одним из важнейших достоинств ВЧД разряда является высокая степень чистоты газового потока. Это следствие того, что разряд является слаботочным, а также осуществляется диффузная привязка ВЧ дуги к охлаждаемым электродам без дугового пятна, так что разрушения электродов и загрязнения газового потока практически не происходит.

Как видно из рис.1, в плазмотроне использована аксиальная схема, когда на одной оси находятся дуговой разряд и истекающая струя, благодаря чему достигается максимальная температура в струе и высокое постоянство параметров плазменного потока в поперечном сечении на выходе разрядного канала. Для уменьшения пульсаций выходных параметров газовой струи плазмотрон выполнен с фиксированной длиной дуги, что позволяет получать стабильные высоковольтные слаботочные дуги.

Схематично конструкция ВЧ дугового плазмотрона представлена на рис. 2. ВЧ дуговой разряд зажигается в разрядной трубке (2) между центральным стержневым электродом (4), на который подается ВЧ напряжение, и полым заземленным электродом (9). Узел ВЧ электрода позволяет устанавливать различные электроды как по исполнению (охлаждаемые металлические электроды, неохлаждаемые электроды), так и по длине. В качестве земляного электрода используется полый медный охлаждаемый водой электрод (9) с внутренним диаметром $(0,5-0,9) d_{тр}$.

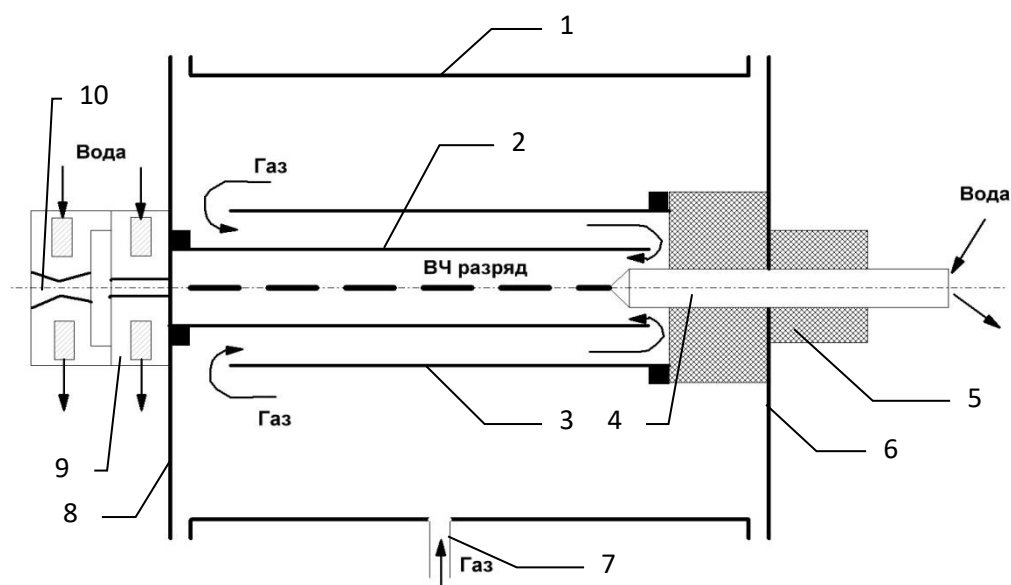


Рис. 2. Схема конструкции камеры плазмоторона

Разряд стабилизируется продольным потоком газа в трубке (2). Диаметр трубки $d_{тр}$, используемой как межэлектродная вставка, выбирается в пределах $(9 \cdot 10^{-3} - 22 \cdot 10^{-3})$ м. Трубка выполнена из кварца, толщина стенок в пределах $(1,5 - 1,3) \cdot 10^{-3}$ м. Достоинством кварца являются хорошие диэлектрические свойства на высоких частотах, высокая термическая стойкость. Для защиты кварцевой трубки от перегрева организовано охлаждение ее за счет холодного рабочего газа, который проходит в зазоре между дополнительной кварцевой трубкой (3) и основной разрядной трубкой (2). Кроме охлаждения, такая схема позволяет предварительно прогреть газ перед подачей его в зону разряда и повышает общий КПД плазмоторона.

Для снятия механических нагрузок с кварцевых трубок вся конструкция плазмоторона (см. рис. 2) помещена в камеру высокого давления (1), выполненную из конструкционной стали. Камера позволяет проводить испытания при давлениях до 10^7 Па. Газ в камеру подается через штуцер (7). В крышках камеры (6) и (8) закреплены электродные узлы. Полый электрод (9) закреплен непосредственно на стальной крышке (8), а узел ВЧ электрода установлен в крышке (6) на изоляторе (5). Изолятор изготовлен из фторопласта, обладающего хорошими диэлектрическими свойствами. Для устранения пробоев, которые могут возникать за счет высоких напряженностей электрического поля на границах диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью, металлические части электродного узла в изоляторе и сам изолятор в крышке камеры запрессованы так, чтобы устранить внутренние воздушные включения.

При иницировании дуги предварительно зажигается Е-разряд. Этот разряд за счет потока газа в трубке замыкается на электрод (9) и образует дугу. Формирование газовой струи с заданными газодинамическими параметрами происходит в сменном водоохлаждаемом геометрическом сопле Лаваля (10). Конструкция плазмоторона позволяет получать и использовать дуги при давлениях от 10^5 до 10^7 Па при различных расходах химически активных газов.

Важным является вопрос о загрязнении газового потока продуктами разрушения конструкции установки. Основными термически напряженными элементами в установке являются электроды. Детальный анализ их работы установил следующее. Для ВЧ дугового разряда, как отмечено выше, характерна диффузная привязка разряда к электродам. Проявляется это в том, что в

приэлектродной зоне не происходит дополнительной контракции разряда и отсутствует разогретое до высокой температуры дуговое пятно на поверхности электрода. ВЧ дуга в приэлектродной зоне расширяется и охватывает большую площадь электрода. Особенно это характерно для интенсивно охлаждаемых электродов. Вблизи электрода температура разряда снижается, а ВЧ токи замыкаются токами смещения через электрическую емкость разряд-электрод.

Разрушения других элементов конструкции плазмотрона практически не происходит. Столь малые разрушения объясняются свойствами используемого типа разряда для разогрева газа. Для ВЧ дуги характерна как диффузная привязка, так и слаботочный высоковольтный режим работы. Это, с одной стороны, позволило вкладывать в разряд достаточно большие мощности, а с другой – из-за малых токов облегчило тепловой режим работы электродов.

Использование дуги как нагревательного элемента ставит свои технические проблемы. Одна из них – снижение потерь тепла в стенке разрядной трубки для повышения теплового КПД плазмотрона. Помимо потерь тепла, обусловленных конвекцией и теплопроводностью газа, существуют радиационные потери за счет излучения столба дуги. Проведенные экспериментальные исследования влияния излучения на тепловой баланс ВЧ дуги в воздухе позволяют сделать вывод, что радиационные потери при давлении (10^5 – 10^6) Па составляют малую долю в общей тепловой мощности и при расчетах их можно не учитывать. При увеличении давления доля радиационных потерь возрастает, и в этом случае требуется их учет. Исследования также позволили определить оптимальные размеры ВЧ дугового плазмотрона: диаметр разрядной трубки и длину разрядного промежутка.

При соотношении диаметра трубки ($2R$) и диаметра разряда ($2r_0$) от 3 до 5 ВЧ дуга сохраняет устойчивое положение около оси трубки и радиационные потери из разряда достаточно малы (4–10 %).

Питание ВЧ дуги осуществлялось от ВЧ генератора. Генератор собран по 2-контурной схеме на генераторном триоде ГУ-22А (рис. 3). Частота генерации $f = 13,6$ МГц. Выходная мощность до 20 кВт. Но в форсированном режиме работы лампы по сеточной цепи возможно снимать с генератора мощность до 50 кВт.

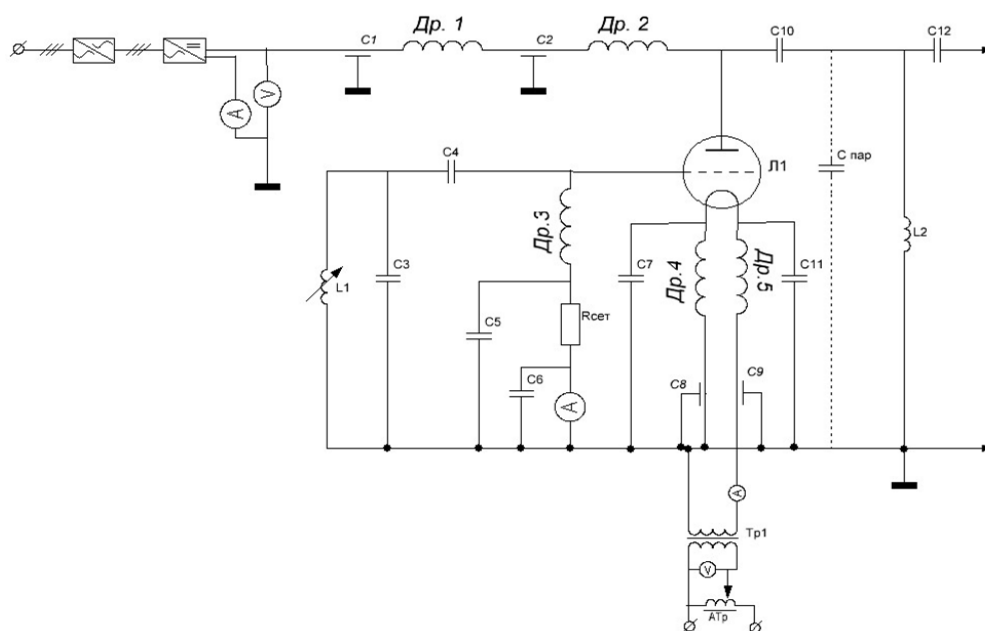


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема ВЧ генератора

Аэродинамическая часть построена на основе сменных геометрических сопел

(сопла Лавалья), устанавливаемых в зависимости от требуемых параметров потока. Диаметры критических сечений для различных сопел изменяются от 2,5 до 5 мм. В случае если не требуется получения сверхзвуковых потоков, в качестве выходного устройства применялись цилиндрические каналы диаметрами от 5 до 8 мм.

В примере, приведенном ниже, демонстрируются испытания композиционных теплозащитных материалов, армированных кремнеземной тканью. Образцы, подвергаемые испытаниям, представляют собой металлические пластины размером 20·20·2 мм, покрытые с одной стороны теплозащитным слоем.

Параметры испытаний:

- газ – воздух;
- давление в камере плазмотрона – превышение 0,5 атм.;
- температуры торможения – 2 000 °С;
- скорость струи на срезе сопла – 700 ± 10 м/с;
- диаметр струи – 8 мм.

Образцы устанавливаются на оси потока под углом к оси для удобства визирования поверхности образца оптическим регистратором. Расстояние от среза сопла устанавливалось на основании тарировочных данных и определялось необходимым значением температуры на поверхности образца при испытаниях. Регулировка температуры проводилась как изменением расстояния, так и дополнительной подачей холодного газа через дренажные отверстия в камеру смешения перед соплом.

Время испытания устанавливалось от 10 до 180 с.

Фотографии образцов в процессе и после испытаний приведены на рис. 4.

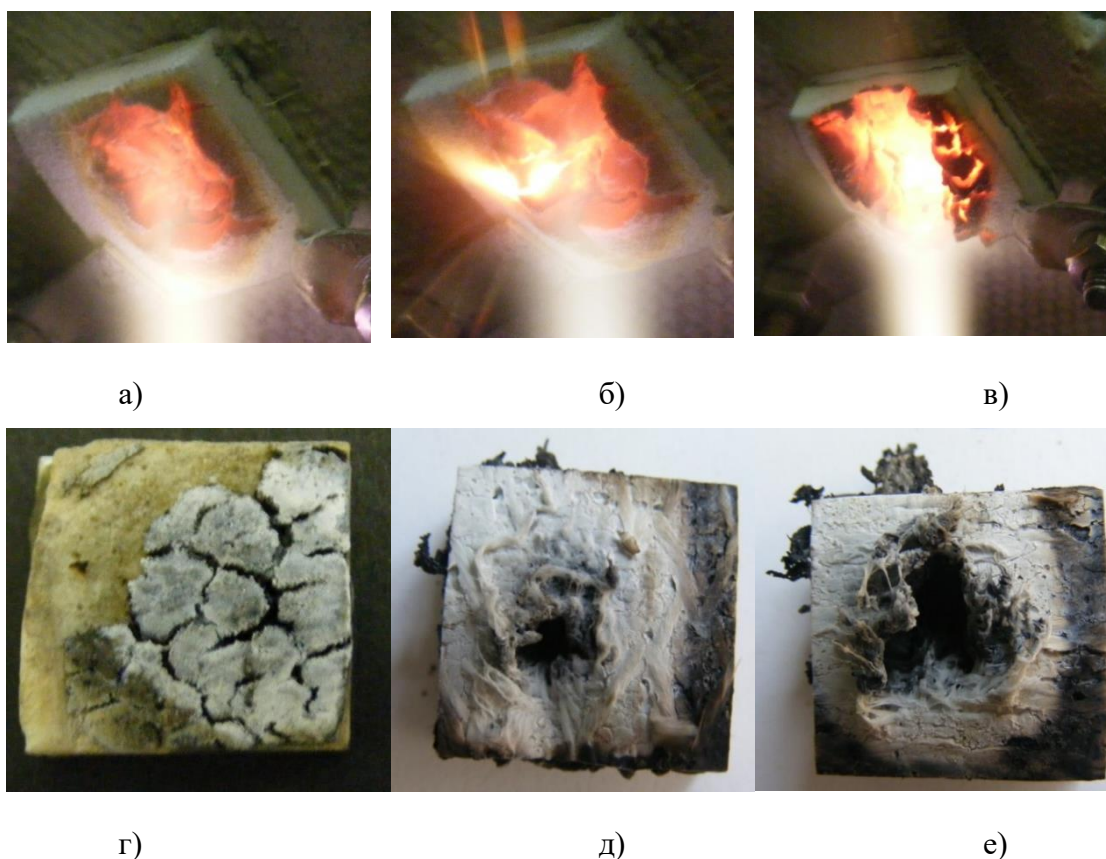


Рис. 4. Образцы материала композиционных материалов, армированных кремнеземной тканью во время (а, б, в) и после испытаний (г, д, е) на стойкость в высокотемпературном воздушном потоке

Опыт использования установки в течение продолжительного времени показал

универсальный характер испытательного стенда. Легкость перенастройки под задачу текущего испытания, стабильность поддержания параметров испытания, сравнительная экономичность цикла испытаний поддерживают востребованность стенда для различных испытательных задач.

Установка используется для получения сравнительных характеристик огнеупорных материалов, теплозащитных материалов и покрытий, изучения механизмов разрушений метеоритного вещества при полете в атмосфере Земли. Также с использованием плазменных газовых потоков выполнялись работы совместно с кафедрой РМ по проведению плазмохимических реакций, например, по получению диоксида и нитрида алюминия заданной кристаллической структуры.

Список литературы

1. *Полежаев, Ю. В.* Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. – Москва. : Энергия, 1976. – С. 328.
2. *Кокорин, А. Ф.* Теоретическое исследование высокочастотного дугового разряда / А. Ф. Кокорин // Вестник УГТУ-УПИ. – 2006. – Вып. 5 (76). – С. 290–300.

Сведения об авторе:

Кокорин Анатолий Федорович, канд. физ.-мат. н., доцент кафедры ЭФ, Екатеринбург, Россия. Эл. почта: a.f.kokorin@urfu.ru.

TEST STAND FOR THE STUDY OF HEAT-PROTECTIVE MATERIALS AND COATINGS

A. F. Kokorin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

The stand is a combination of a plasmatron and an aerodynamic device for the formation of a gas flow of specified parameters. The plasmatron uses a high-frequency arc gas discharge to heat the gas. This discharge is stable in a wide range of pressures and velocities of the gas flow. A high-voltage low-current form of a high-frequency discharge is used, with low erosion of the electrodes and a low degree of contamination of the gas stream. The plasma torch is powered by a tube RF generator with an operating frequency of 13,56 MHz and an output power of up to 50 kW. The aerodynamic part is built on the basis of replaceable geometric nozzles (de Laval nozzles), installed depending on the required flow parameters.

Key words: heat-protective materials; plasma; gas; arc discharge.

References

1. *Polezhaev Yu. V., Yurevich F. B. Teplovaya zashchita // Yu. V. Polezhaev, E. B. Yurevich. – Moscow: Energiya, 1976. – P. 328.*
2. *Kokorin A. F. Teoreticheskoe issledovanie vysokochastotnogo dugovogo razryada / A. F. Kokorin // Vestnik UGTU-UPI. 2006. – Vol. 5(76), Pp. 290–300.*