

**Перегревная
неустойчивость для ВЧ
дугового разряда в
воздухе при
повышенных давлениях**

Кокорин А.Ф. Попов А.А.-УрФУ-г. Екатеринбург

2025

В работе представлены некоторые результаты разработки теоретической модели высокочастотного дугового разряда в воздухе при давлениях выше атмосферного. Модель данного типа разряда позволила реализовать расчет вольтамперных характеристик и энергетического баланса ВЧ дуги в зависимости от геометрических размеров плазмотрона для различных давлений и расходов плазмообразующего газа.

Электрический разряд в виде стабилизированной дуги является эффективным средством в организации высокотемпературных процессов. Примером тому может служить подогрев газа в аэродинамических трубах и химических реакторах, плавка и резка металлов, нанесение жаростойких покрытий, нагрев газа при прямом восстановлении металлов из руд и т.д.

В УрФУ (ранее УГТУ – УПИ) разработана аэродинамическая установка, предназначенная для испытания теплозащитных материалов и покрытий в высокотемпературных скоростных потоках газа. Установка представляет собой комбинацию высокочастотного дугового плазматрона с аэродинамическим устройством.

«Перегревная неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»

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 40 кВт.

Аэродинамическая часть построена на основе сменных геометрических сопел (типа сопла Лаваля), устанавливаемых в зависимости от требуемых параметров потока.

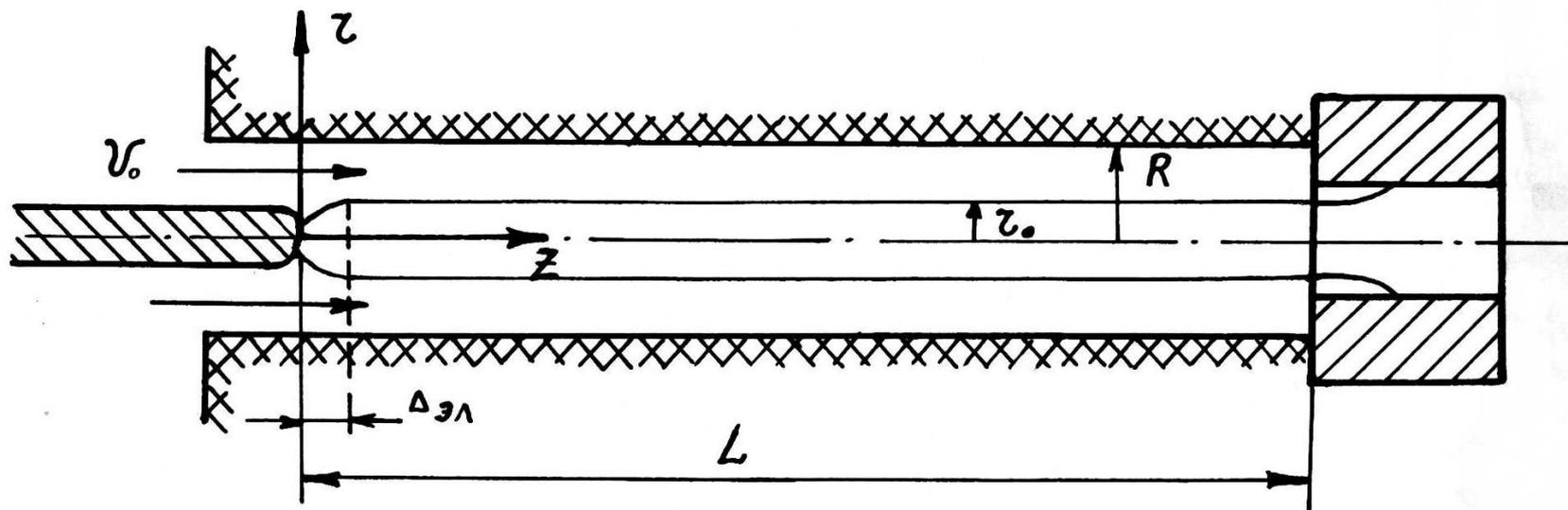
Установка используется для получения сравнительных характеристик огнеупорных материалов и теплозащитных покрытий, также в технологических циклах проведения плазмохимических реакций.

«Перегревная неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»

ВЧ дуговой разряд, сочетая в себе достоинства электродных дуговых разрядов постоянного тока и высокочастотных разрядов, позволяет производить разогрев газов различного рода в широком диапазоне давлений (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 порядка 70-80%. Разряд устойчив к срыву, имеет стабильные параметры выходного газового потока.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Расчетная модель ВЧ дугового разряда.

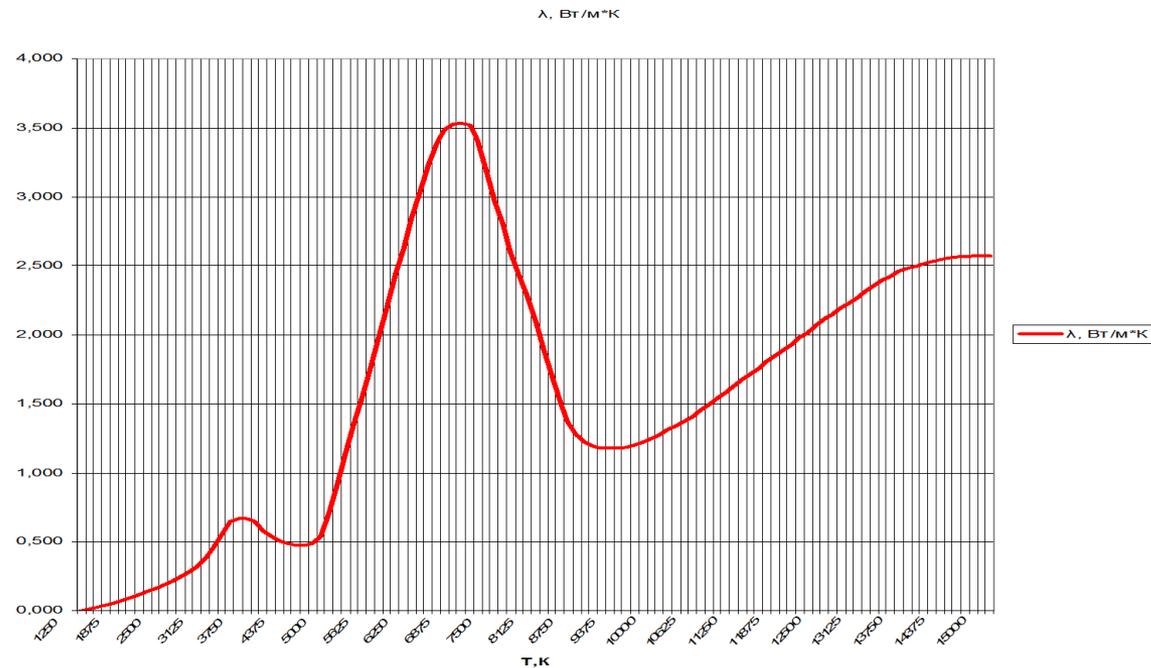


Кокорин А.Ф. Попов А.А.
УрФУ
г. Екатеринбург
2025

L – длина дуги;
 R – радиус стенки;
 r_0 – радиус разряда;
 V – скорость потока газа;
 $\Delta_{эл}$ – размер приэлектродной зоны.

«Перегревная неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»

Важной особенностью дугового разряда в воздухе является появление перегривной неустойчивости, связанной с немонотонной зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры. Немонотонность теплопроводности связана с диссоциацией молекул азота и кислорода и, согласно данным, использованным в расчетах, имеет два пика при давлении $p=1$ атм: в диапазоне температур (3500-4500) К и (7000-10000) К. Положение пиков зависит от давления. При его увеличении пики смещаются в сторону больших температур.



Кокорин А.Ф. Попов А.А. - УрФУ-г. Екатеринбург

2025

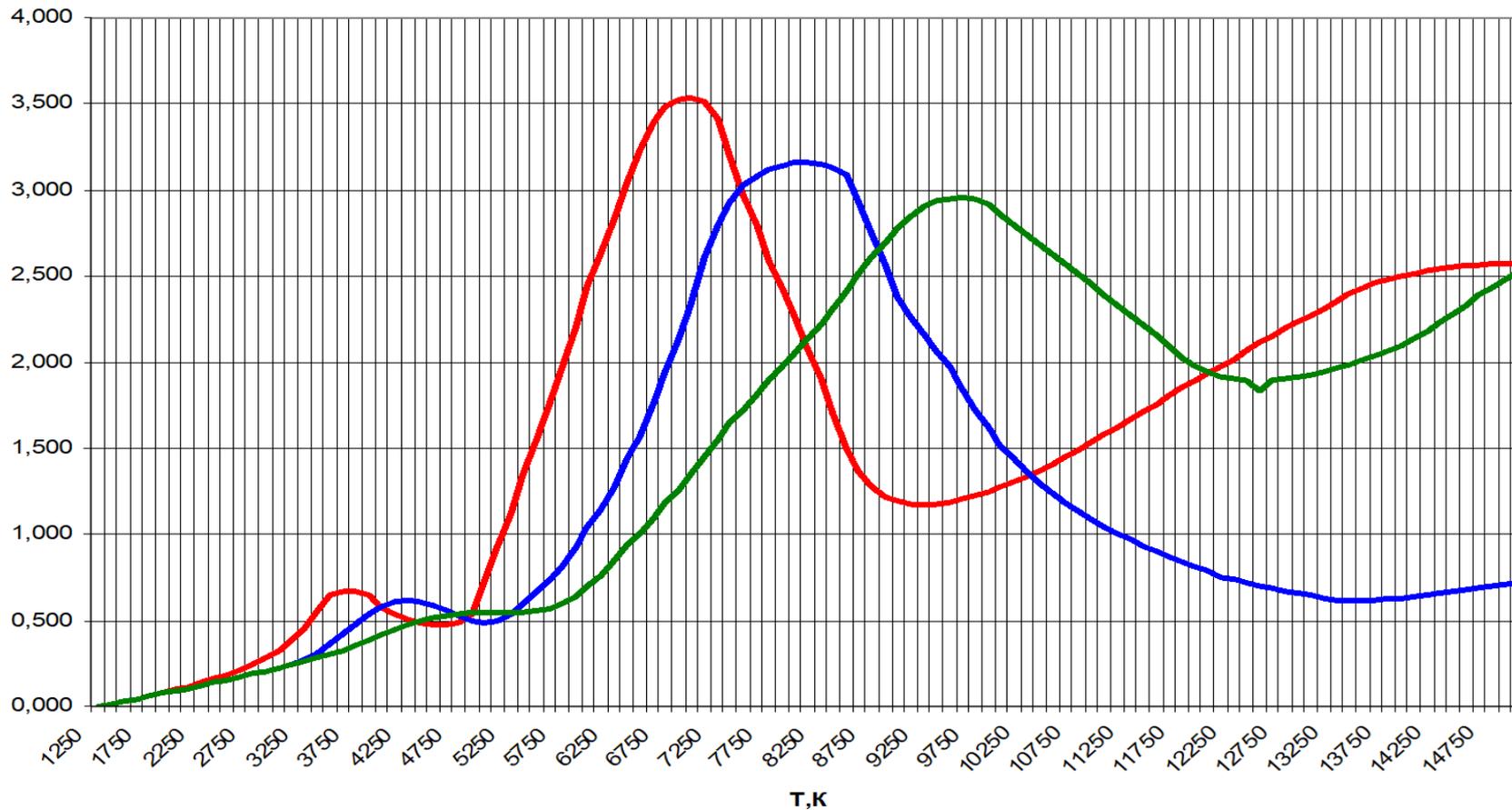
«Перегревная неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»

P=1_красный

100_зеленый

10_голубой

λ , Вт/м*К



Кокорин А.Ф. Попов А.А. - УрФУ-г. Екатеринбург

2025

«Перегреваемая неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»

В результате перегреваемой неустойчивости появляются скачки тока и температуры плазмы, а на вольтамперных характеристиках дуги — петлеобразные участки. Необходимым условием появления перегреваемой неустойчивости является выполнение соотношения

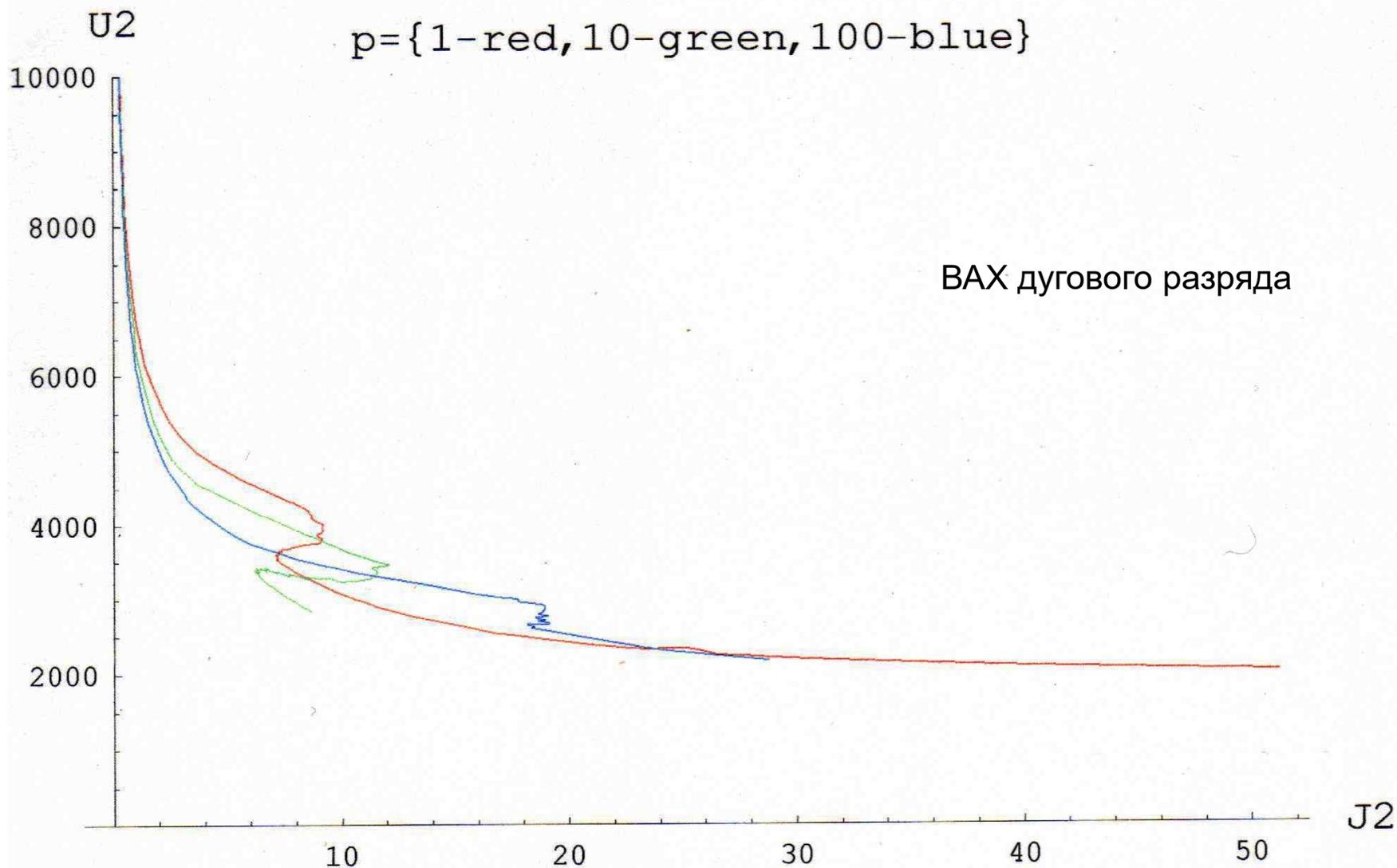
$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} < \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT}$$

Поскольку зависимость $\sigma=\sigma(T)$ монотонно возрастающая и величины σ и λ существенно положительны, то условие выполняется на падающих участках зависимости $\lambda=\lambda(T)$.

Неустойчивость при температурах (3400-5000) К в практических режимах ВЧ дуги не реализуется, поскольку мощности выделяемой на этих участках ВАХ не достаточно для поддержания дуги.

Неустойчивость при температурах (7000-10000) К более выражена и оказывает существенное влияние на режим работы ВЧ дуги.

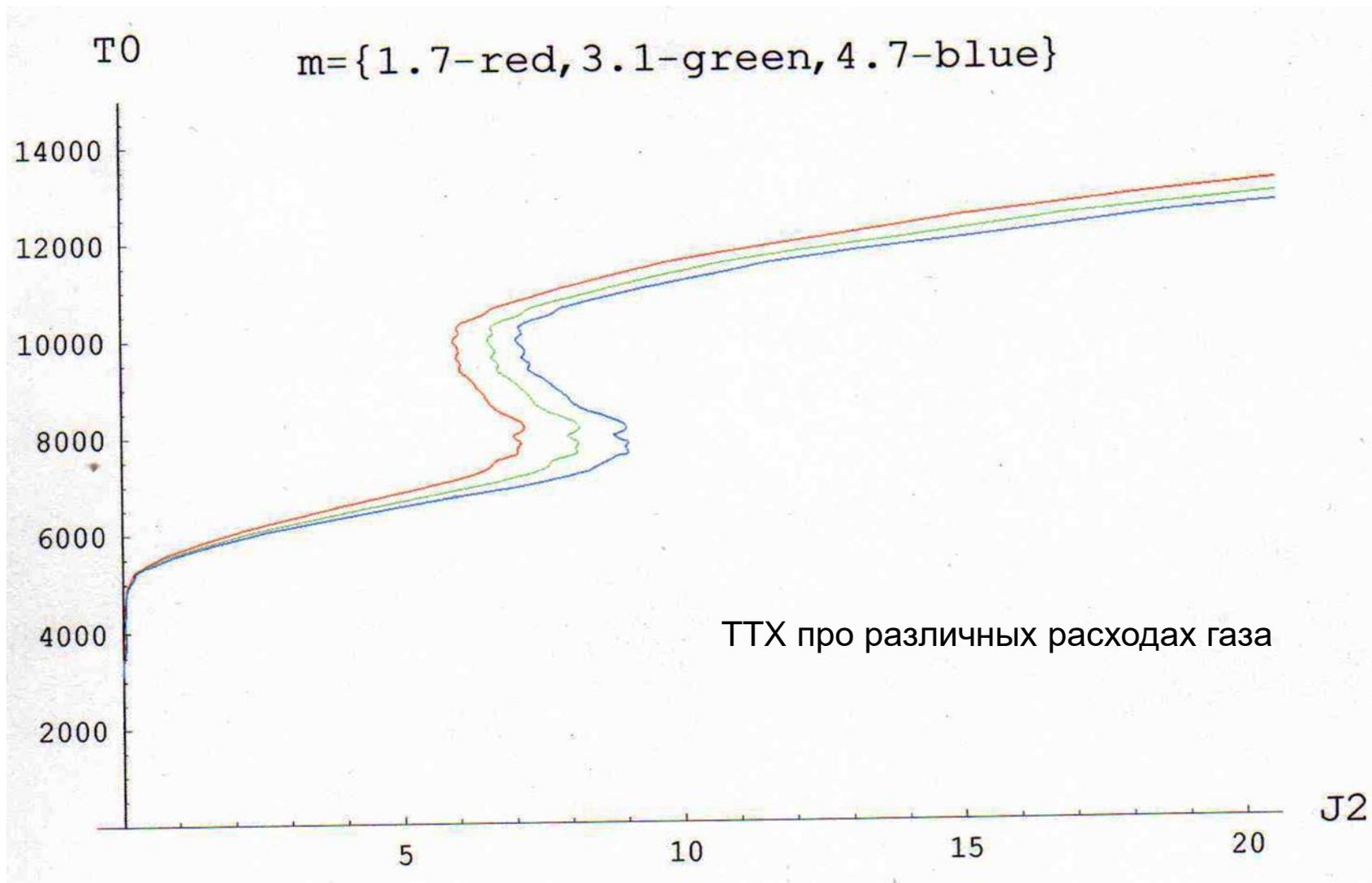
«Перегревная неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»



Кокорин А.Ф. Попов А.А. - УрФУ-г. Екатеринбург

2025

«Перегревная неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»



Кокорин А.Ф. Попов А.А. - УрФУ-г. Екатеринбург

2025

«Перегревная неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»

Как видно на ВАХ и ТТХ, одному значению тока разряда соответствует три значения напряжения и температуры дугового разряда. Состояния плазмы, соответствующие участку петли с отрицательным дифференциальным сопротивлением, неустойчивы. Увеличение давления сдвигает область неустойчивости в сторону больших температур. Если при давлении $p=1\text{атм}$ неустойчивы состояния начиная с 7000 К до 10000 К, то при давлении $p=10\text{атм}$ перегревная неустойчивость начинается с 10000 К. Указанные зависимости хорошо иллюстрируются ТТХ.

Токи, при которых появляется перегревная неустойчивость, лежат при давлении $p=1\text{атм}$ в диапазоне (6-9) А, при давлениях $p=10\text{атм}$ в пределах (8-12) А, а при давлениях $p=100\text{атм}$ — (18-19) А.

Увеличение расхода газа через разрядную трубку приводит к увеличению области неустойчивости (на ВАХ наблюдается увеличение размеров петлеобразных участков).

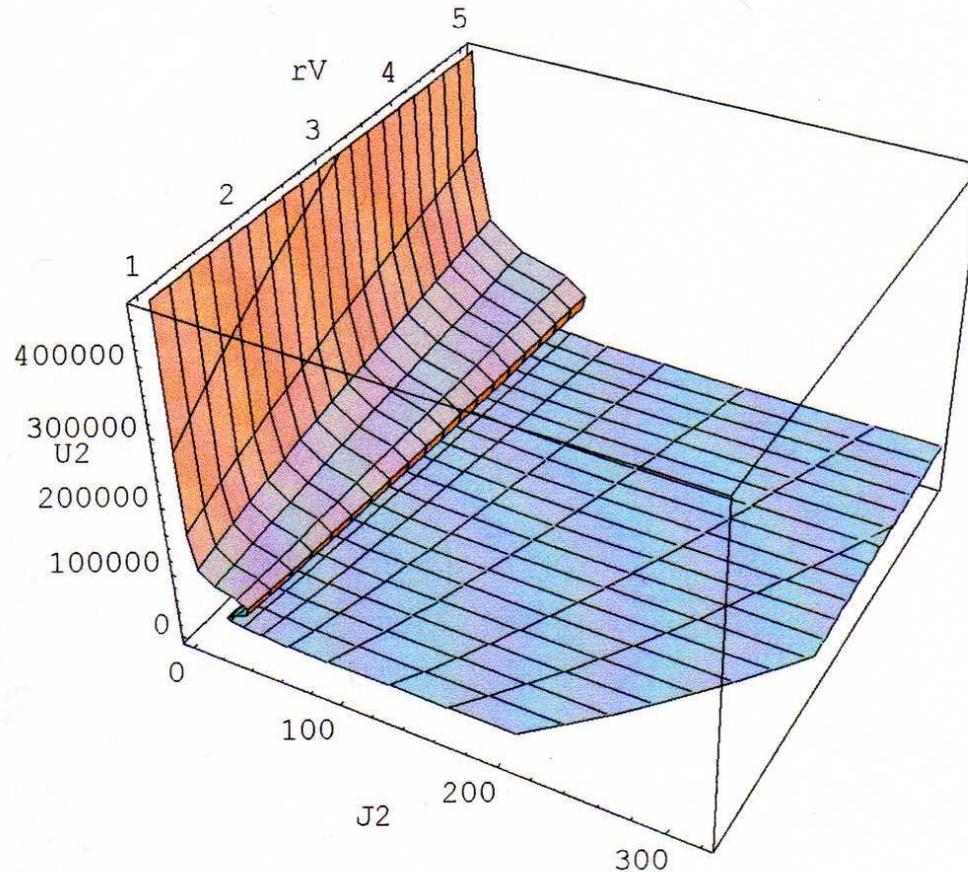
Увеличение радиуса разрядного канала сдвигает область неустойчивости в сторону больших токов.

«Перегревная неустойчивость для ВЧ дугового разряда в воздухе при повышенных давлениях»

Перегревная неустойчивость подтверждалась экспериментально при исследовании ВЧД разряда. Скачки тока сопровождались резким ростом температуры плазмы и излучения из разрядной области. Увеличивалась активная мощность разряда, но особенно сильно возрастала реактивная мощность разряда. Связано это как с увеличением тока, так и индуктивности разряда, вызванной уменьшением радиуса токопроводящей зоны.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ДУГОВОЙ РАЗРЯД

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ



Кокорин А.Ф.
УрФУ
г. Екатеринбург
2011

3d профили вольтамперных характеристик при разных расходах газа.