

УДК 621.79

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Алексеев Сергей Олегович

*Студент 3 курса,  
кафедра «Технологии сварки и диагностики»  
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: В.М. Неровный,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики»*

Основные параметры сварного соединения определяет используемый источник энергии, который, в свою очередь, характеризуется интегральными и локальными параметрами. К первым относятся величины характеризующие источник в целом, это, например, мощность  $Q$  и сила тока  $I$ . Вторые, а именно их определению посвящена данная работа, характеризуют каждую точку в зоне воздействия источника теплоты. Таковыми являются плотность тока  $i$ , плотность мощности  $q$  и другие. Подавляющее большинство источников энергии, используемых для сварки, пайки и наплавки, являются осесимметричными, другие в данной статье не рассматриваются.

Проблема определения локальных параметров источника энергии не нова, специалисты занимаются ей уже не одно десятилетие [1]. Проведено множество исследований и экспериментов. Получены данные позволяющие качественно и, отчасти, количественно описать распределения плотности тока и плотности мощности по радиусу (для осесимметричных источников),  $i(r)$  и  $q(r)$  соответственно. Практически все основные работы в этой области были проведены десятилетия назад, когда развитие информационных технологий только начиналось. На сегодняшний день получены огромные возможности по математической обработке данных, которые ещё 20 - 30 лет назад казались научной фантастикой. В связи с таким стечением обстоятельств возникает вопрос: "А не следует ли заново обработать данные уже проведённых экспериментов и получить гораздо более точные результаты?". Конечно, не нужно пересчитывать все опыты начиная с времён Ньютона, но есть экспериментальные данные которые, однозначно, требуют уточнения.

Для этой работы была выбрана серия экспериментов по изучению дугового разряда с полым катодом (ДРПК). Этот источник энергии с большой степенью точности можно принять за осесимметричный. Трудностью при изучении ДРПК явилось то, что обычно  $i(r)$  и  $q(r)$  для сварочных источников энергии можно считать подчиняющимися нормальному закону распределения (нормально-круговые источники

теплоты), а для данного вида дугового разряда это допущение противоречило экспериментальным данным. Особенно большое расхождение теории и реальных процессов наблюдалось при значительных величинах силы тока, это проявлялось в том что по расчетам глубина проплавления получалась значительно меньше, чем на практике. Возникла необходимость как можно точнее описать распределение локальных параметров ДРПК, так как без этой информации подбор режимов для сварки становился практически не решаемой задачей. Было проведено большое число экспериментов, на описании которых хотелось бы остановиться и рассказать более подробно. Для определения тепловых параметров источника энергии применялось проточное калориметрирование. Этот метод основан на измерении разности температур  $\Delta T$  потока воды на выходе и входе в проточный калориметр, нагреваемый поверхностным источником энергии

$$q = \bar{c} \Delta T \dot{m}$$

(1)

где  $\bar{c}$  - средняя удельная теплоёмкость воды в интервале температур  $\Delta T$ , Дж/(кг\*К);  $\dot{m}$  - массовый расход воды, кг/с.

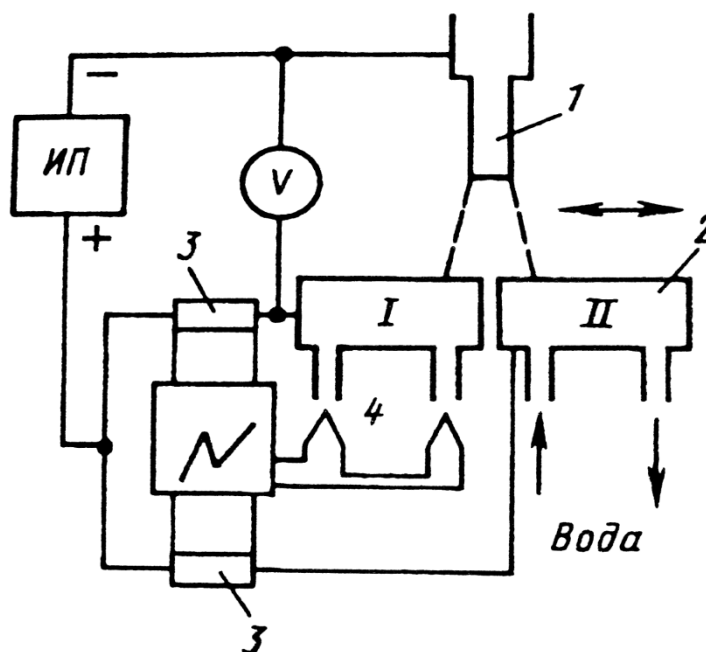


Рис. 1. Схема измерения распределения значений теплового потока  $q(x)$  и тока  $I(x)$  в ДРПК методом секционированного анода: 1 – полый катод; 2 – секционированный анод; 3-измерительный шунт; 4-дифференциальная термопара.

Вся теплота, воспринимаемая поверхностью калориметра, передаётся через стенку и уносится потоком охлаждающей воды, т.е. имеет место равновесие подводимой и отводимой мощностей. Поэтому этот метод

принято называть стационарным.

При экспериментальном определении теплоэнергетических характеристик дугового разряда применяют специальные калориметры: линейный, плоскостной и точечный [2].

Для определения  $q(x)$ ,  $i(x)$ ,  $i(r)$  и  $q(r)$  наиболее целесообразно использовать широко известную методику секционированного анода (плоскостной калориметр), который и был применён в обсуждаемой серии опытов. Плоский водоохлаждаемый зонд разделён на два участка электротепловым барьером. Температура охлаждающей воды измеряется по обоим участкам. Схема измерения  $q(x)$  и  $i(x)$  показана на рис. 1.

Стоит подробнее рассказать об используемой системе координат (см. рис. 2). Ось разряда движется в сторону анода со скоростью  $v$ ,  $R$  – радиус активного пятна.  $X$  – координата, отсчитываемая от оси до края анода,  $r$  – текущий радиус, откладываемый от оси.

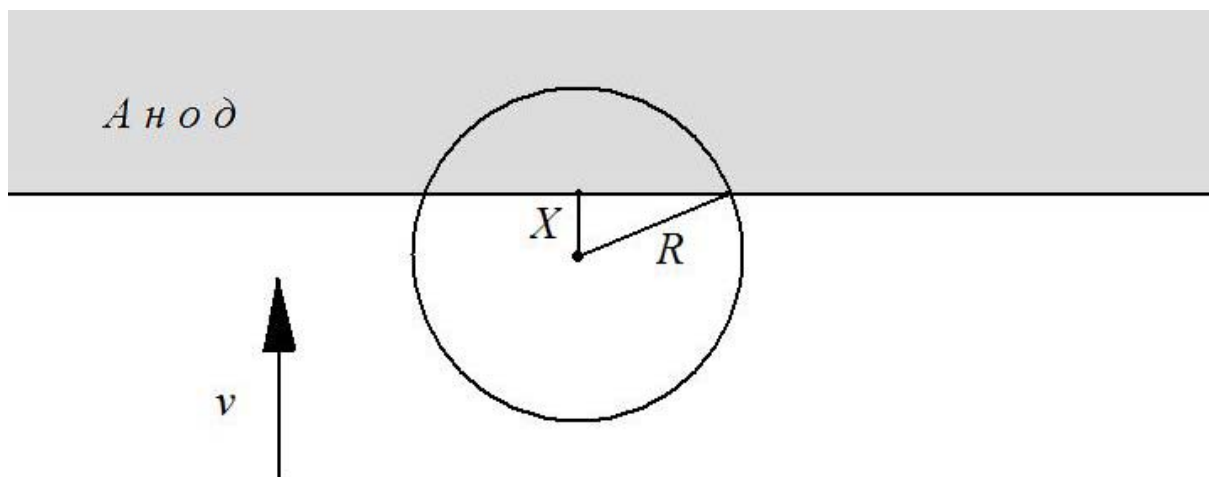


Рис. 2. Система координат

Полученные из опыта данные, характеризующие рост  $q(x)$  и  $i(x)$ , были обозначены через функцию  $\Psi(x)$ . Пользуясь принятым допущением об осесимметричности источника энергии, можно выразить значение  $\Psi(x)$  через радиальную функцию  $f(r)$ , соответствующую  $i(r)$  или  $q(r)$  [1]:

$$\Psi(x) = 2 \int_x^R f(r) \cdot r \cdot \arccos(x/r) dr. \quad (2)$$

Это уравнение можно привести к следующему виду:

$$\varphi(x) = 2 \int_x^R \frac{f(r) \cdot r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr, \quad (3)$$

откуда следует что

$$\varphi(x) = -\Psi'(x), \quad (4)$$

Решением интегрального уравнения относительно  $f(r)$  является [3]:

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{\varphi'(x) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} - \frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{\Psi''(x) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}, \quad (5)$$

где  $R$  - радиус пятна.

Данный метод нашел широкое применение благодаря ряду преимуществ:

1. Одновременное измерение  $I, Q, q(r)$  и  $i(r)$  непосредственно в зоне воздействия дугового разряда на анод.
2. Создание условий, наиболее полно соответствующих процессам реальной теплопередачи от разряда к плоской поверхности анода-изделия.
3. Наименьшее искажение истинной картины распределения  $i(r)$  и  $q(r)$ , так как геометрические размеры зазора между плоскостными зондами могут быть существенно меньше, чем размеры линейного зонда.

Несмотря на изложенные преимущества, метод плоского водоохлаждаемого зонда, т.е. секционированного анода, имеет существенный недостаток, обусловленный сложностью математической обработки экспериментальных данных  $I(x)$  и  $Q(x)$ , поскольку, как следует из уравнения (5), требуется найти вторую производную от экспериментальной функции, что в общем случае относится к классу некорректно поставленных задач, когда даже малые погрешности в исходных данных могут привести к весьма большим ошибкам результата.

Ранее для решения этой проблемы распространённым способом было представление уравнения (5) в виде [1]:

$$f(r) = -\frac{N}{\pi R} \sum_{k=1}^N A_{k,N} \Psi(x),$$

где  $N$  - число зон радиального разбиения сварочной дуги;  $A_{k,N}$  - коэффициенты, вычисленные методом Нестора-Олсена для каждой из этих зон.

Такой способ решения часто приводит к качественному изменению вида распределения  $f(r)$ , в частности, появлению провалов в приосевой области даже при незначительном разбросе экспериментальных данных. В то время как для метода секционированного анода характерен значительный разброс экспериментальных данных, обусловленный, так называемым, шумом измерений. Различные методы сглаживания не позволяют получить значения для радиального распределения плотности тока или плотности потока мощности в приосевой зоне с погрешностью менее 20%.

Так же были использованы методы решения основанные на применении кубических сплайнов. Суть такого подхода заключалась прежде всего в аппроксимации заданной таблично функции  $\Psi(x)$  кубическими сглаживающими сплайнами  $S_{n,\alpha}$  при известных его коэффициентах и решении уравнения (5) в виде [1,3]:

$$f(r) = \frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{S_{n,a}(x) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}$$

Погрешность этого метода составила около 4%.

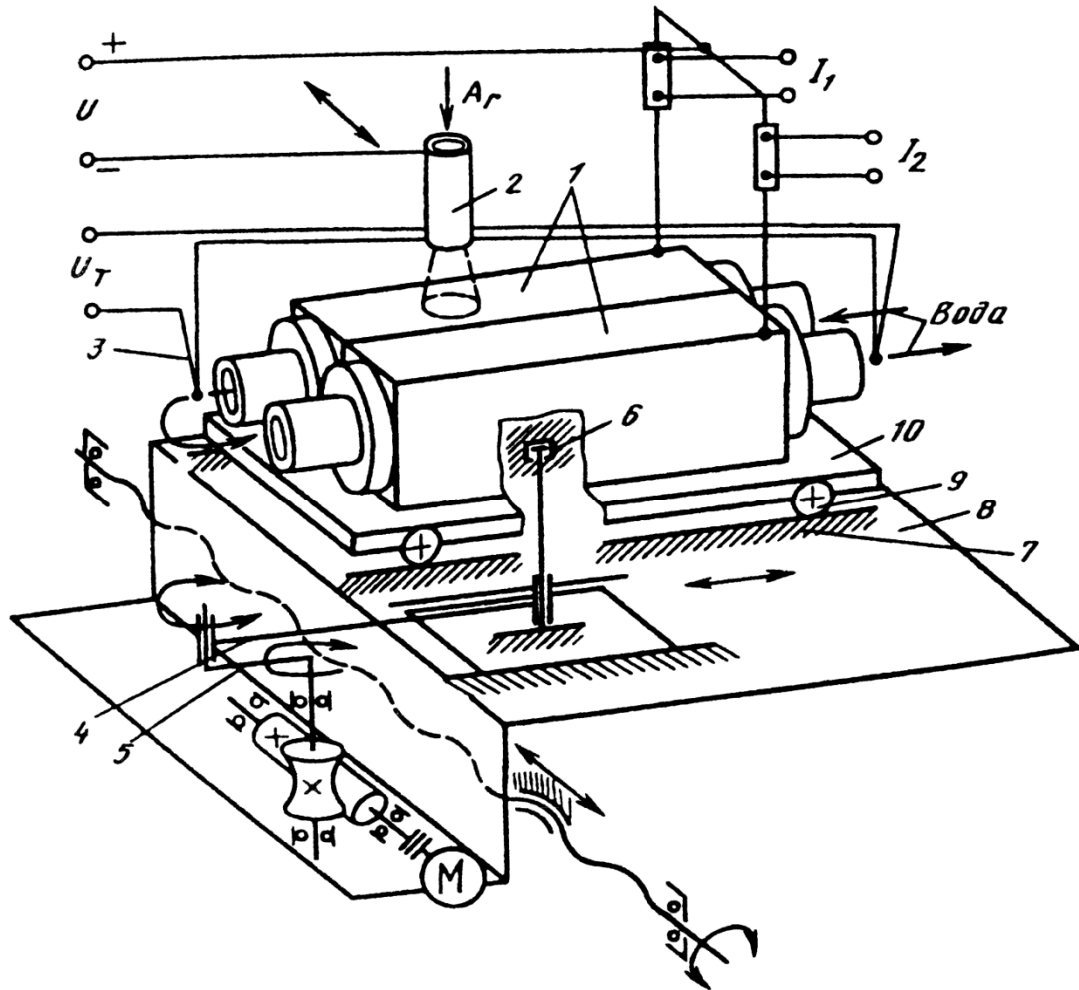


Рис. 3. Схема подвижного секционированного анода:

1 – анодные секции; 2 – полый катод; 3 – дифференциальная термопара; 4 – шатун; 5 – кривошип; 6 – шарнир; 7 – направляющие; 8 – подвижная опора; 9 – вращающиеся опоры; 10 – подвижная платформа.

Ещё одним недостатком метода секционированного анода явилось то обстоятельство, что конструкция этого прибора не позволяет измерять тепловые характеристики ДРПК на токах свыше 150 А и при длине дугового промежутка менее 2 см. Однако, проблема была решена усовершенствованием конструкции анода (Рис. 3) [4].

На сегодняшний день стремительное развитие информационных технологий позволяет нам преодолеть все вышеизложенные сложности, применяя уже разработанное программное обеспечение. Используя стандартные алгоритмы, которые за прошедшие годы перешли на абсолютно новый уровень, можно избавиться от шума измерений, более точно провести сглаживание функции, дифференцировать и интегрировать со значительно меньшими погрешностями. В данной работе была использована программа

Origin 8.

Первой задачей при нахождении функций радиального распределения локальных параметров ДРПК стала выработка нового алгоритма решения. На этом этапе ещё не важны способы сглаживания или избавления от шума, цель в разработке общего плана действий. В итоге вся задача была разбита на следующие пункты:

1. Фильтрация. С помощью различных программных средств, происходит фильтрация экспериментальных данных, шум измерений убирается. В результате имеется вид функции  $\Psi(x)$  в первом приближении (Рис. 4).

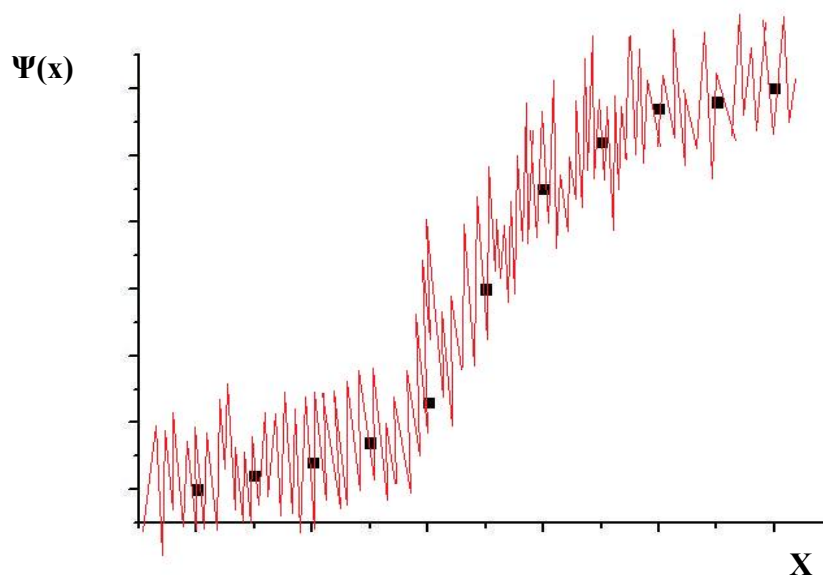


Рис. 4. Фильтрация.

2. Сглаживание. Функция, полученная в пункте 1, сглаживается, найденная зависимость  $\Psi(x)$  (рис. 5) является исходными данными для решения уравнения(5).

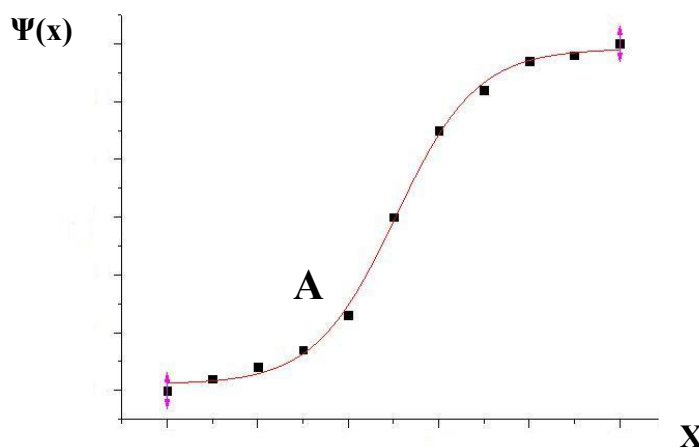


Рис. 5. Сглаживание

3. Дифференцирование. Нахождение второй производной от  $\Psi(x)$ .
4. Разбиение активного пятна. Выбираем шаг разбиения и, зная радиус активного пятна, находим значения текущих радиусов  $r_n$  для которых будут вычислены функции вида:

$$g_n(x) = \frac{\Psi''(x)}{\pi\sqrt{x^2 - r_n^2}},$$

Где  $n$  - количество зон разбиения.

Также следует отметить, что гораздо эффективнее выбирать непостоянный шаг разбиения, уменьшая его в наиболее значимых местах, например, в приосевой области.

5. Интегрирование. Функции, полученные в предыдущем пункте, интегрируются, в результате чего имеются точки с координатами (рис. 6):

$$x_n = r_n,$$

$$y_n = \int_{r_n}^R g_n(x).$$

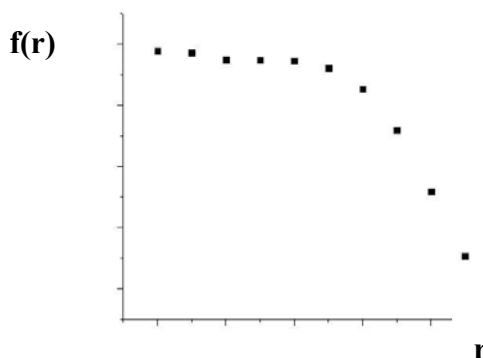


Рис. 6. Решение в первом приближении.

6. Нахождение искомой зависимости. Сглаживая полученные точки, находим искомую функцию (рис. 7).

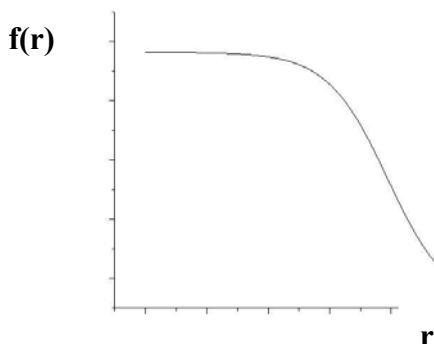
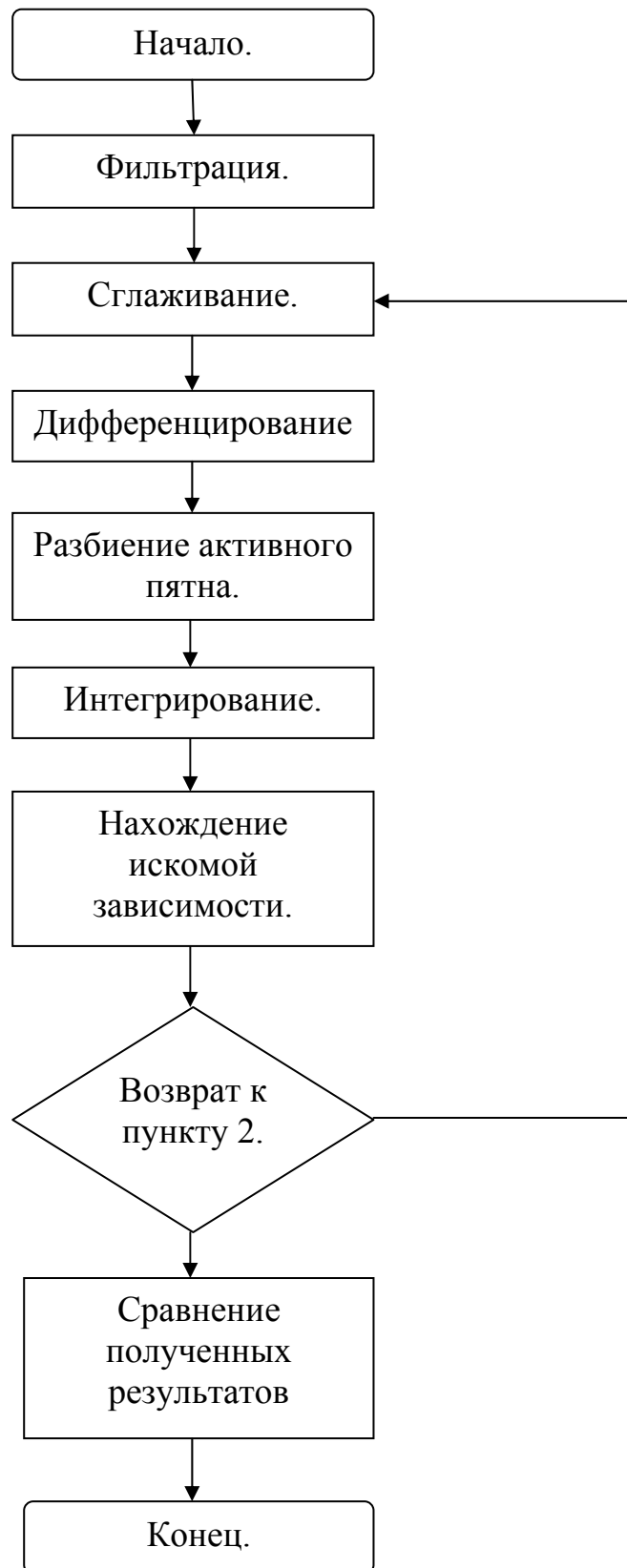


Рис. 7. Искомая зависимость

7. Возврат к пункту 2. Заново выполняем пункты 2 - 6 включительно. Находим несколько вариантов вида искомых распределений.

8. Сравнение полученных результатов. Выбираем наиболее точный вариант.

Для дальнейшей работы удобнее представить этот алгоритм в виде блок-схемы:



Блок-схема 1

Второй и наиболее трудной задачей стал выбор способа сглаживания данных, полученных после фильтрации. В ходе работы было применено более 20 методов сглаживания, среди которых было выбрано 3 наиболее удачных. Использовались функции вида:

1.  $y = a_1x^5 + a_2x^4 + a_3x^3 + a_4x^2 + a_5x + a_6$
2.  $y = a \cdot (1 - e^{-bx})$
3.  $y = A_1 + \frac{(A_2 - A_1)}{(1 + 10^{p \cdot \ln(x_0 - x)})}$

Так как исследуемый источник энергии осесимметричный, то можно использовать только часть функции  $\Psi(x)$ , находящуюся по одну сторону от точки перегиба А (см. рис. 5). При сглаживании для функций вида 1 и 2 предполагается использование только указанной части  $\Psi(x)$ , для функции вида 3 - всей зависимости.

В результате были найдены 3 варианта зависимостей локальных параметров ДРПК от радиуса, наиболее точным из которых оказался вариант полученный, с применением сглаживания экспоненциальной функцией вида 2. Ниже приведены конечные результаты обработки экспериментальных данных для ДРПК с различными значениями силы тока (рис. 8).

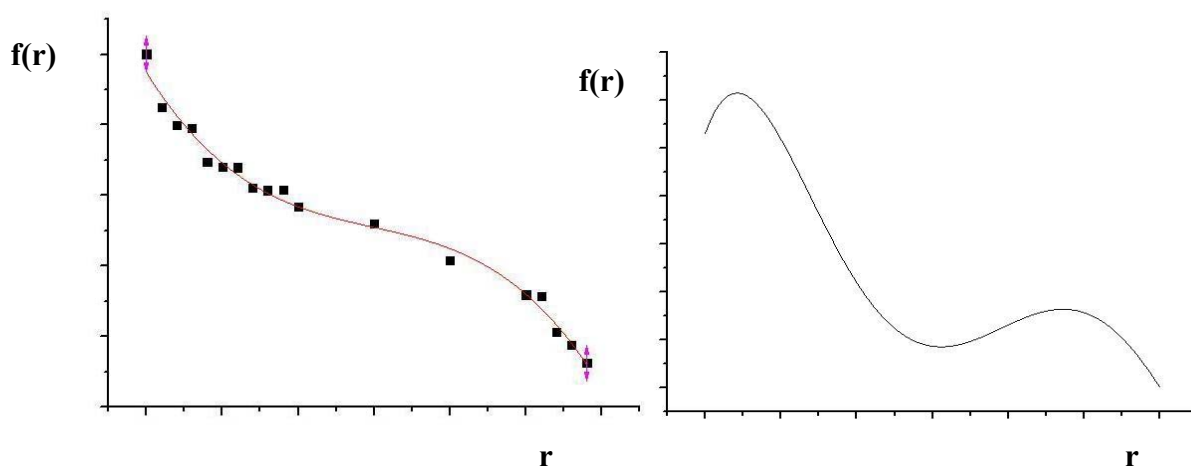


Рис. 8. Результаты обработки экспериментов с различными параметрами дуги.

Какие выводы можно сделать из полученных результатов? Выше уже говорилось, что описать зависимости  $i(r)$  и  $q(r)$  ДРПК нормальным законом распределения, как это делается для других источников энергии в сварочных процессах, нельзя. И полученные зависимости это подтверждают, в приосевой области наблюдается резкий скачок плотности тока и плотности потока мощности. Этим и объясняется столь сильное различие расчетной и реальной мощностей ДРПК.

Таким образом, разработанный в этой работе алгоритм, применим для обработки любых экспериментов, связанных с нахождением радиальных распределений параметров, характеризующих осесимметричные объекты. Но основное применение этих алгоритмов предполагается для изучения сварочных источников энергии.

### Литература

1. Шоек П.А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. -М.: Энергия, 1966. - С. 110-139.
2. Соснин Н.А. Определение радиального распределения удельной термической мощности и плотности тока по пятну нагрева дуги стабилизированной потоком газа // Труды ЛПИ им. М.И. Калинина. - 1974. - № 336. - С. 75-81.
3. Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике // Издательство «Наука» сибирское отделение.- Новосибирск, 1984.
4. Неровный В.М., Федичев В.П., Подъяпольский Г.В. Измерение радиальных распределений теплоэнергетических параметров на аноде сильноточного дугового разряда низкого давления // Инженерно-физический журнал. - 1988. - Т. 54, № 2. -С. 256-262.