

УДК 537.527

Нестационарная трехмерная модель электрической дуги. Часть 2. Верификация

Р.М. Урусов, И.Р. Урусова

*Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР,
Бишкек, Кыргызстан*

E-mail: urusov_rus@mail.ru

С целью тестирования нестационарной трехмерной математической модели выполнены численные расчеты электрической дуги во внешнем магнитном поле. Численно реализована дуга конусной и винтовой формы. Удовлетворительное согласие результатов расчета с экспериментальными данными свидетельствует в целом о корректности математической модели и вычислительного алгоритма.

Ключевые слова: численное моделирование, нестационарная трехмерная математическая модель, электрическая дуга во внешнем магнитном поле.

Введение

В работе [1] представлена нестационарная трехмерная математическая модель электрической дуги, включая граничные и начальные условия, а также результаты тестирования модели и методики расчета на примере дуги с контрагированной анодной привязкой. В настоящей работе приводятся результаты тестирования модели на примере электрической дуги, горящей во внешнем магнитном поле.

Обсуждение результатов

Отметим, что в настоящей работе за направление электрического тока принято направление движения электронов от катода к аноду. На представленных далее рисунках при изображении векторных полей скорости масштаб векторов не выдержан, в целях экономии места представлены только основные фрагменты расчетной области.

1. Электрическая дуга во внешнем поперечном магнитном поле

Рассчитывается электрическая дуга в аргоне атмосферного давления. Параметры разряда приняты близкими к условиям эксперимента [2]: стержневой графитовый катод диаметром $d_c = 7$ мм, сила тока $I = 317$ А, межэлектродное расстояние $L = 20$ мм, однородное внешнее поперечное магнитное поле в направлении, обратном направлению оси z (рис. 1), величиной $H^{\text{Ext}} = 1,3$ кА/м. Радиус привязки дуги на торце катода определялся приближенно по фотографии дуги и принят равным $r_c = 1,5$ мм, толщина графитового анода $l_a = 5$ мм. Значения временного и сеточного шагов полагались равными $\tau = 10^{-4}$ с и $\Delta = 0,5$ мм соответственно. До момента времени $t = 10$ мс расчет проводится без внешнего магнитного поля. После этого начинается отсчет времени ($t = 0$) для дуги во внешнем магнитном поле.

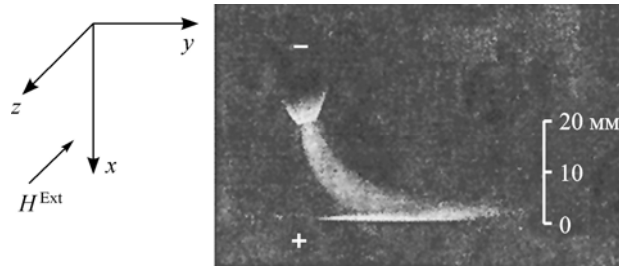


Рис. 1. Фотография дуги [2] с графитовыми электродами во внешнем поперечном магнитном поле.
 $H^{\text{Ext}} = 1,3 \text{ кА/м}$, $I = 317 \text{ А}$, $L = 20 \text{ мм}$.

На рис. 2 показаны расчетные поля температуры, векторного поля течения плазмы в вертикальной плоскости $X-Y$ при $z = Z/2$ в различные моменты времени на интервале $t = 0-2 \text{ мс}$. Взаимодействие токопроводящего дугового канала с внешним поперечным магнитным полем порождает пондеромоторную силу $f \sim \mathbf{j} \times (\mathbf{H} + H^{\text{Ext}})$ (\mathbf{j} , \mathbf{H} — соответственно векторы плотности электрического тока и напряженности магнитного поля), направленную в данном случае (правило левой руки) преимущественно вдоль оси y . В результате происходит смещение столба дуги в том же направлении. С течением времени все более возрастает асимметрия теплового поля вдоль оси y , и с момента времени $t \approx 10 \text{ мс}$ дальнейшему смещению препятствует скольжение дуги [3, 4].

После $t \approx 10 \text{ мс}$ характеристики дуги в высокотемпературной области практически не меняются, и при $t = 20 \text{ мс}$ вычисления были остановлены.

Результаты расчета удовлетворительно согласуются с опытными данными [2], в которых установлено, что деформация дуги происходит непрерывно и плавно, начиная с катода и заканчиваясь на аноде. Сравнение с фотографией дуги (ср. рис. 1 и 3) показывает,

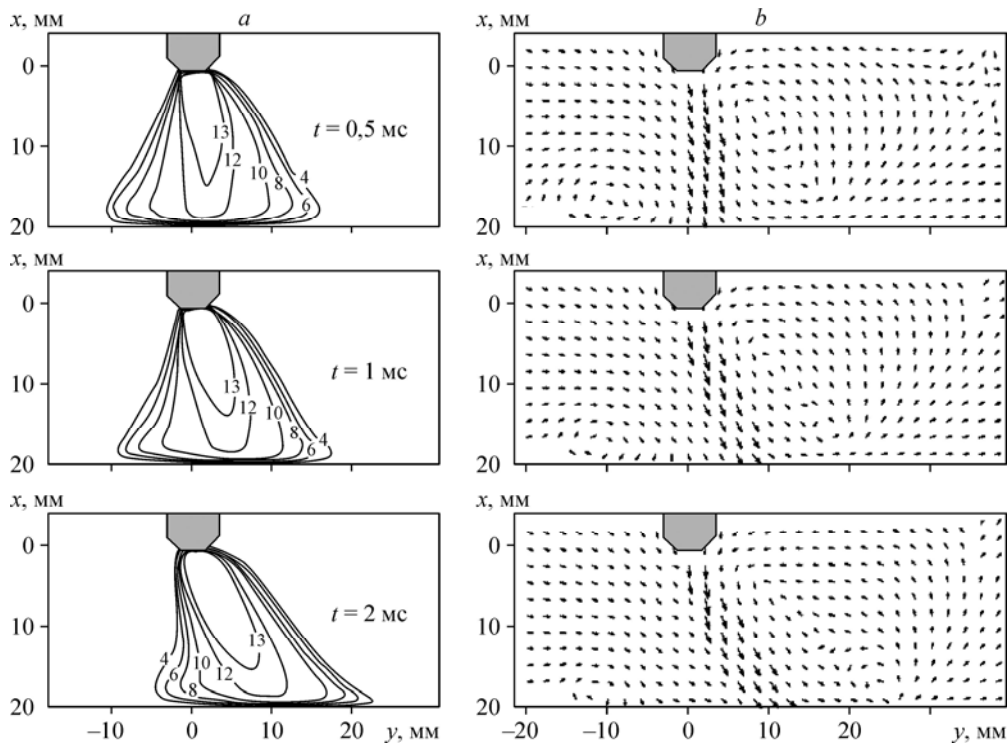
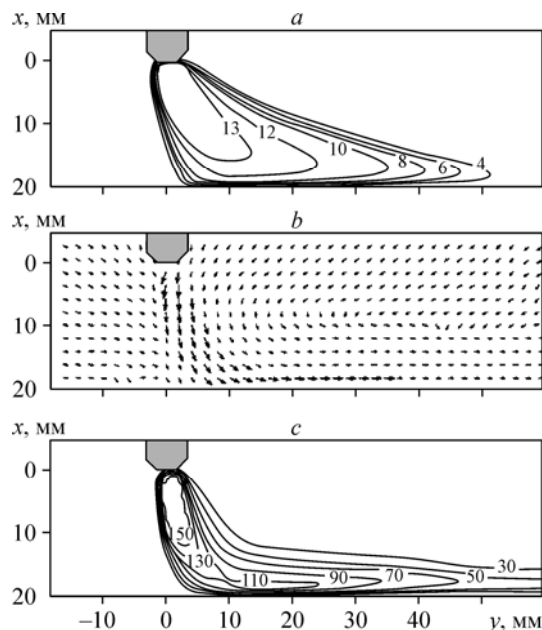


Рис. 2. Расчетные распределения характеристик дуги.
 а — поле температуры T (кК), б — векторные поля скорости плазмы V в плоскости $X-Y$ в различные моменты времени t .

Рис. 3. Расчетные распределения характеристик дуги.

a — поле температуры T (кК), b — векторное поле скорости плазмы \mathbf{V} , c — изолинии скорости $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ в плоскости X – Y после выхода на стационарный режим; $t = 20$ мс.

что после выхода на стационарный режим горения рассчитанное смещение анодного пятна (определяемое по линии максимальной температуры) от центральной оси составляет около 11 мм, что также согласуется с наблюдаемым в действительности смещением ≈ 14 мм. Вместе с тем, некоторое отличие наблюдается по профилю дуги в вертикальной плоскости X – Y , а именно — результаты расчета (см. рис. 3) показывают более широкий профиль дуги. Возможно, что отличие результатов является следствием эрозии графита с поверхности катода, чего математическая модель не учитывает.



2. Численная реализация конусной формы дуги во внешнем аксиальном магнитном поле

В работе [5] приведены результаты экспериментальных исследований электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле (ВАМП). Дуга горит в аргоне атмосферного давления, диапазон исследуемых токов составлял $I = 20$ – 300 А, напряженность внешнего магнитного поля достигала 40 кА/м, межэлектродное расстояние дуги $L = 2$ – 6 мм. Эксперименты показали, что при увеличении ВАМП выше некоторого предела происходит качественное изменение пространственной формы дуги — возникает конусная дуга, представляющая собой устойчивое формирование плазмы в виде однородного полого конуса с вершиной в катодном пятне и анодной привязкой в виде кольца.

Расчетные параметры дуги задаются согласно данным [5]: сила тока дуги $I = 220$ А, ВАМП в направлении оси x величиной $H^{\text{Ext}} = 32$ кА/м, межэлектродное расстояние $L = 5$ мм. Форма и размеры вольфрамового катода определялись косвенно по рисункам [5]. Принято, что катодом является стержень радиусом $R_c = 1,4$ мм с углом заточки под конус 90° и притупленной вершиной, радиус катодной привязки дуги $r_c = 0,8$ мм. Поскольку в работе [5] не указаны материал и размеры анода, то эти параметры заданы произвольно: стальная пластина толщиной $l_a = 2$ мм. Значения временного и сеточного шагов равны $\tau = 10^{-5}$ с и $\Delta = 0,2$ мм соответственно.

На представленных далее рисунках отсчет в направлениях осей координат y , z ведется от центральной оси, а отсчет в аксиальном направлении x ведется от вершины конусного катода.

Распределения характеристик в вертикальных средних сечениях X – Z и X – Y приводятся для значений $Y/2$ и $Z/2$ соответственно (см. рис. 2 [1]).

На рис. 4, 5 приведены распределения некоторых характеристик дуги, принятые в начальный момент времени $t = 0$ при наличии ВАМП по условиям эксперимента. В результате воздействия электромагнитных сил (пинч-эффект) холодный окружающий газ вовлекается в дуговой разряд вблизи катода, прогревается и ускоряется в аксиальном

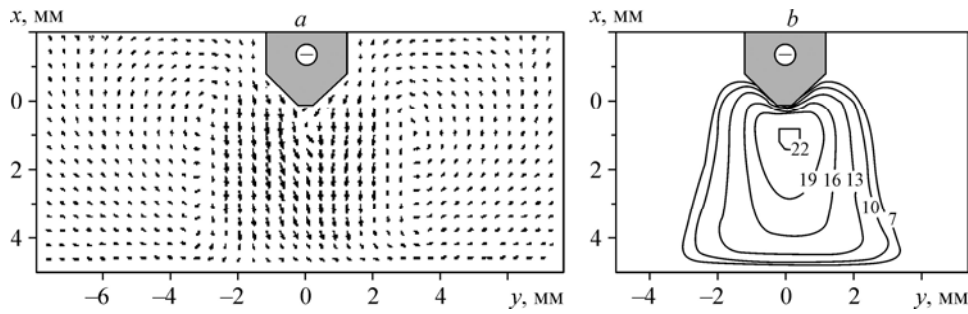


Рис. 4. Начальные ($t = 0$) распределения в сечении $X-Y$.
 a — векторное поле скорости V , b — температура плазмы T (кК).

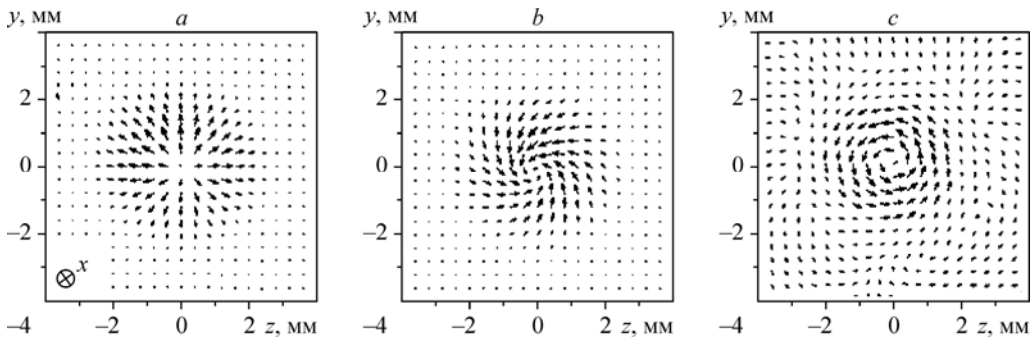


Рис. 5. Начальные распределения векторных полей в поперечном сечении $Y-Z$ на расстоянии $x = 1$ мм от катода.
 a — плотность электрического тока j , b — электромагнитные силы f , c — скорость плазмы V ; ось x направлена внутрь рисунка.

направлении (рис. 4, a), форма теплового столба дуги близка к цилиндрической (рис. 4, b). Взаимодействие радиальной компоненты плотности электрического тока j (рис. 5, a) с ВАМП порождает электромагнитную силу f , направленную в поперечном сечении $Y-Z$ по касательной к столбу дуги (рис. 5, b) (правило левой руки). Воздействие электромагнитных сил на дуговой столб приводит его во вращательное левовинтовое (против часовой стрелки) движение (рис. 5, c) по всей длине, и результирующее течение плазмы является вращательно-поступательным.

К моменту времени $t \approx 0,05$ мс распределения характеристик плазмы по длине дугового столба в поперечном сечении качественно аналогичны показанным на рис. 5, но в аксиальном направлении происходит перестройка характеристик. Центробежные силы обуславливают смещение плазмы из приосевой области на периферию. В приосевой области, особенно вблизи катода, начинает формироваться зона пониженного давления (рис. 6, a), куда со стороны анода движется газ. Вблизи анода образуется циркуляционное течение и аксиальный поток плазмы, движущийся внутри основного потока в противоположном ему направлении (рис. 6, b).

К моменту времени $t \approx 0,5$ мс качественная картина процессов тепло-массообмена в центральной области дуги в целом сформировалась (рис. 7). С момента времени $t > 2$ мс изменения расчетных характеристик конусной дуги практически не происходит и при $t = 10$ мс численный расчет остановлен.

На рис. 8 показаны распределения характеристик после выхода на стационарный режим. Указанные на рисунке компоненты теплового потока определяют соответственно энергию электронов, составляющих ток дуги $q_E = (5k/2e)j_x T_e$ и кондуктивную

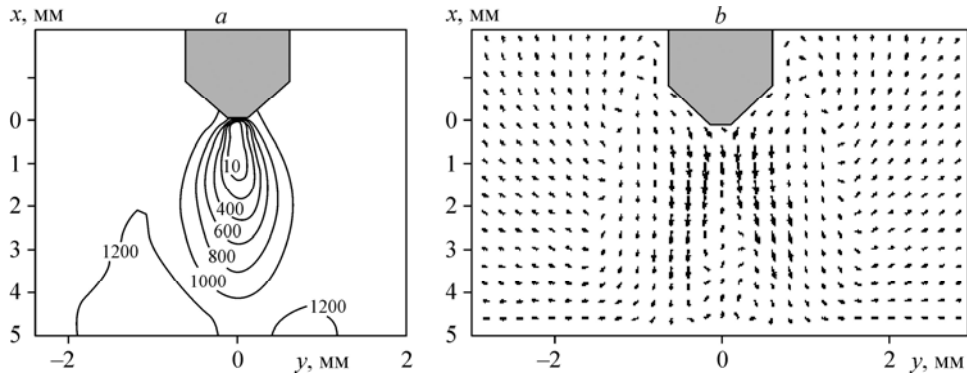
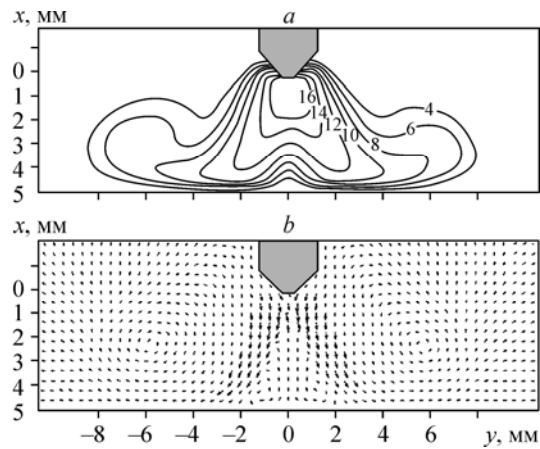


Рис. 6. Расчетные распределения характеристик дуги.

a — давление P (Па), *b* — векторное поле скорости V в сечении X - Y ; $t = 0,05$ мс.

Рис. 7. Расчетные распределения характеристик дуги.

a — распределения температуры плазмы T (кК),
b — векторное поле скорости V в сечении X - Y ;
 $t = 0,5$ мс.



теплопередачу газа тяжелых частиц $q_T = -\lambda \text{grad}T$. Анализ результатов показывает, что тепловое воздействие дуговой плазмы на анод распределяется по кольцевой поверхности диаметром $d \approx 4,5$ мм (рис. 8, *a, b*). Расчетное значение d согласуется с результатами эксперимента [5]. Температура плазмы на расстоянии сеточного шага (0,2 мм) от поверхности анода достигает значений 5,5 кК, а в центре кольца заметно ниже — около 1,5 кК.

В приосевой области (за исключением участка вблизи катода) поток плазмы направлен от анода к катоду (рис. 8, *c, d*). По всей длине дуги наблюдается левовинтовое направление вращения плазмы (аналогично показанному на рис. 5, *c*). На рис. 9 показано

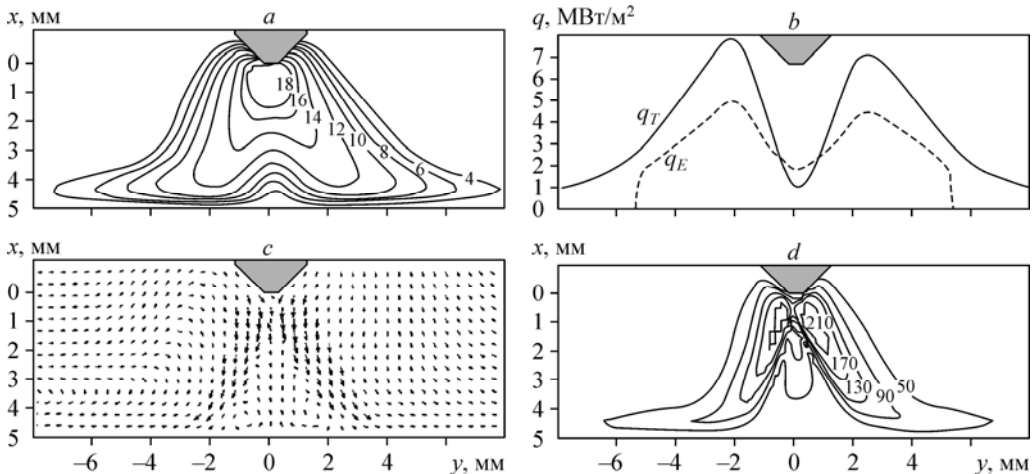


Рис. 8. Расчетные распределения характеристик дуги.

a — температура плазмы T (кК), *b* — компоненты теплового потока q_E, q_T , *c* — векторное (V) и *d* — скалярное (V) поле скорости в сечении X - Y ; $t = 10$ мс.

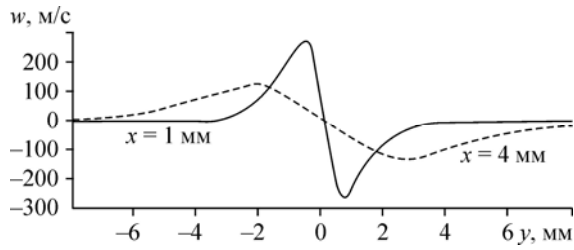


Рис. 9. Радиальное распределение w компоненты скорости плазмы в вертикальном сечении $X-Y$, $t = 10$ мс.

радиальное распределение $w(y)$ компоненты скорости, аналогичное распределение имеет компонента скорости $v(z)$. Видно, что линейная скорость плазмы при движении по окружности является неравномерной в аксиальном направлении x , радиальное распределение компонент скорости v, w в приосевой области близко к линейному распределению.

Таким образом, внутренняя структура дугового столба является набором своеобразных дисков, которые вращаются как твердое тело, имеют различный диаметр и скорость вращения. Например, скорость вращения плазменного диска на расстоянии $x = 1$ мм от вершины катода составляет около $6 \cdot 10^4$ об/с, в то время как скорость вращения для диска при $x = 4$ мм на порядок меньше и составляет $\approx 6 \cdot 10^3$ об/с.

3. Численная реализация винтовой формы дуги во внешнем аксиальном магнитном поле

Как показывают экспериментальные исследования (см., например, [3, 4, 6, 7]), электрическая дуга во внешнем продольном магнитном поле может принимать в ряде случаев винтовую форму.

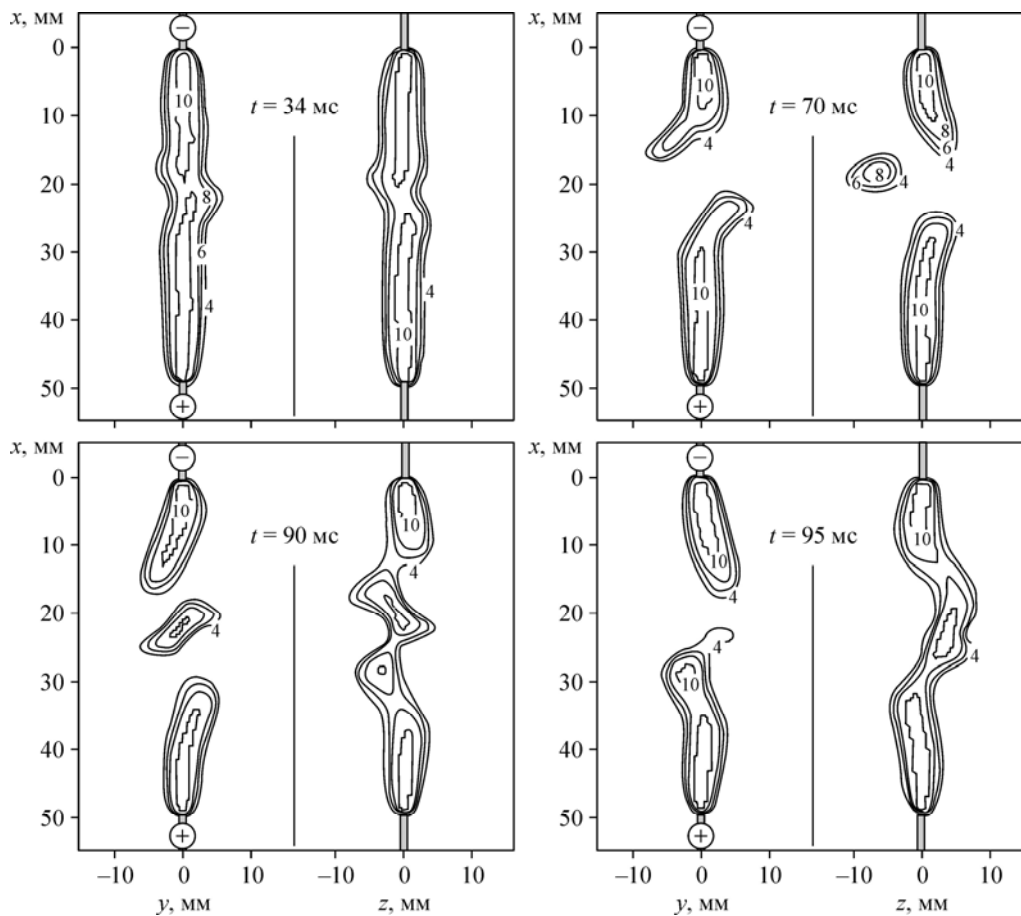


Рис. 10. Эволюция поля температуры T (кК) плазмы в сечениях $X-Y$ и $X-Z$. Начало.

Расчет выполнен при следующих параметрах дуги: сила тока $I = 40$ А, ВАМП в направлении оси x величиной $H^{\text{Ext}} = 1,2$ кА/м, межэлектродное расстояние $L = 50$ мм. Electroдами являются графитовые стержни радиусом 0,5 мм и длиной 5 мм. Значения временного и сеточного шагов равны $\tau = 10^{-4}$ с и $\Delta = 0,5$ мм соответственно.

На рис.10 приведена эволюция поля температуры плазмы на временном интервале до 300 мс в вертикальных плоскостях $X-Y$ и $X-Z$. Начиная с момента времени $t > 30$ мс происходит отклонение столба от цилиндрической формы в средней его части, что согласуется с опытными результатами — в продольном магнитном поле сам столб дуги неустойчив. Сравнение результатов при $t = 70, 90, 95$ мс показывает, что до момента времени $t \approx 110$ мс форма дугового столба непрерывно изменяется. В дальнейшем дуга принимает определенную правовинтовую (по часовой стрелке) пространственную форму, изменения которой во времени уже не столь значительны (см. рис. 10 при $t = 287, 291, 295, 299$ мс). Более наглядное представление о винтовой форме дуги дают трехмерные графики линии максимальной температуры (рис. 11). Анализ температурного поля показывает, что вблизи катода дуга совершает левовинтовое (против часовой стрелки) вращение с периодом около 8 мс (рис. 12). Вместе с тем, вблизи анода столб дуги завершает правовинтовое (по часовой стрелке) вращение.

Взаимодействие ВАМП с радиальной компонентой плотности тока обуславливает левовинтовое направление вращения газа вблизи катода (рис. 13, *a*) и правовинтовое вблизи анода (рис. 13, *b*). В целом характер течения газа достаточно сложный (рис. 13, 14), и в отсутствие трехмерной графики трудно представить общую картину.

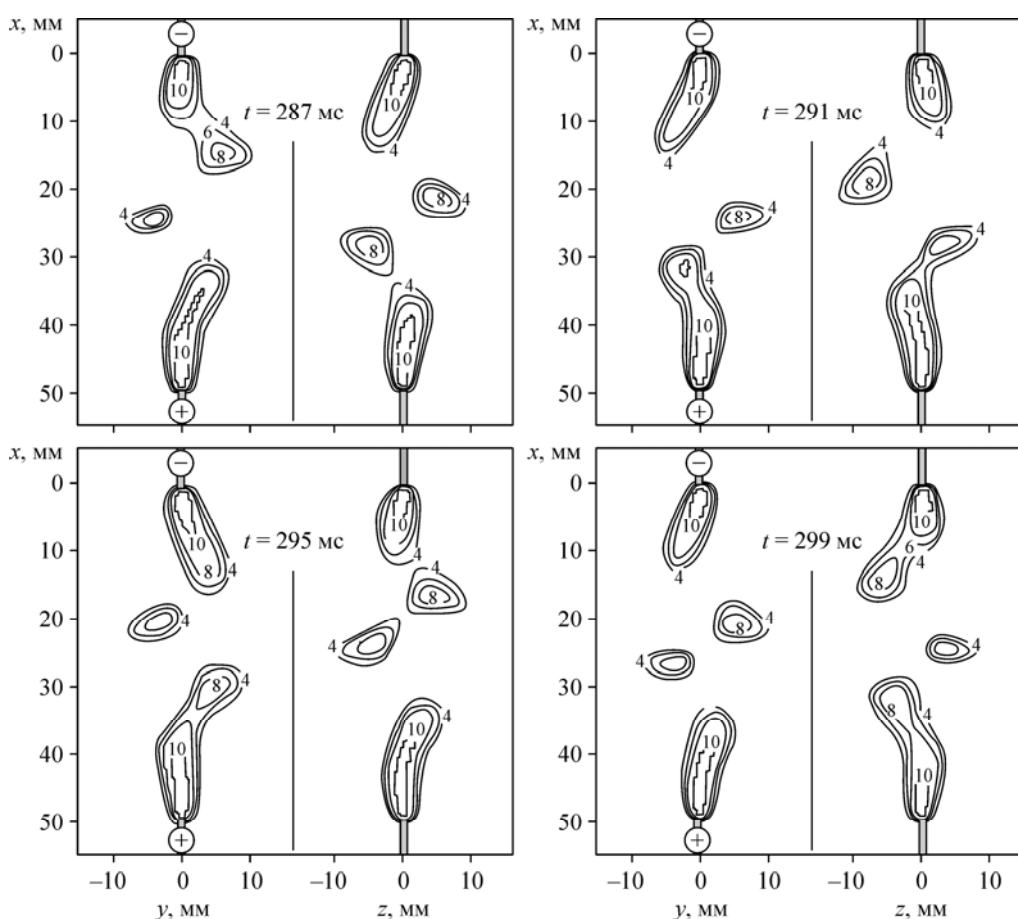


Рис. 10. Окончание.

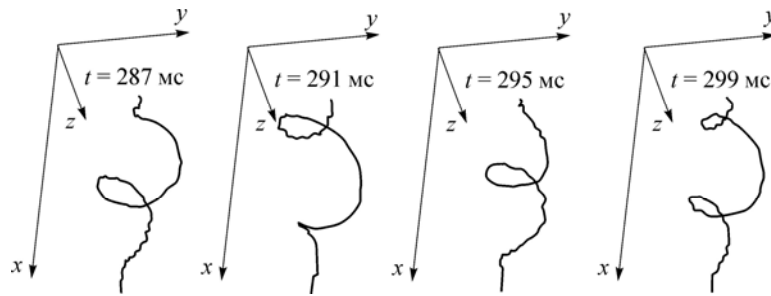


Рис. 11. Эволюция линии максимальной температуры газа.

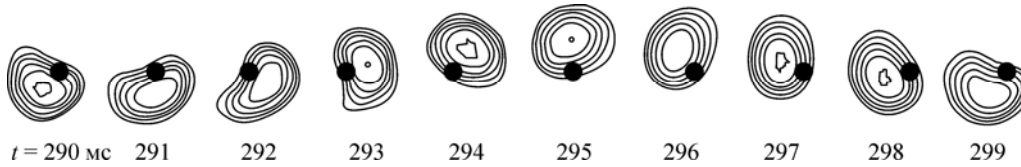


Рис. 12. Эволюция поля температуры в поперечном сечении дуги на расстоянии 10 мм от катода. Черный маркер — положение центральной оси.

Физика процессов, обуславливающих винтовую форму дугового столба, является достаточно сложной и, по-видимому, до конца не изученной (см. напр. [3–4, 6–11]). Кроме того, численная реализация винтовой формы дуги имеет ряд отличительных особенностей, требующих отдельного обсуждения.

В заключение отметим, что среднее время расчета одного варианта достаточно велико. В зависимости от размеров расчетной области и временного интервала время расчета составляет 70–120 часов (CPU Intel i7, 3.2 GHz, 4×Cores, DDR 8 GB). Детальные исследования влияния на результаты расчета значений τ , ε , Δ потребуют многих сотен часов компьютерного времени, что пока не представляется возможным. В подобной ситуации приходится ограничиваться единичными расчетами, а основным критерием достоверности полученных результатов является их непротиворечивость и соответствие опытным данным. Отметим лишь, что сравнение результатов расчета при сеточном шаге $\Delta = 0,2$ и $0,5$ мм показало удовлетворительное качественное согласие, а результаты

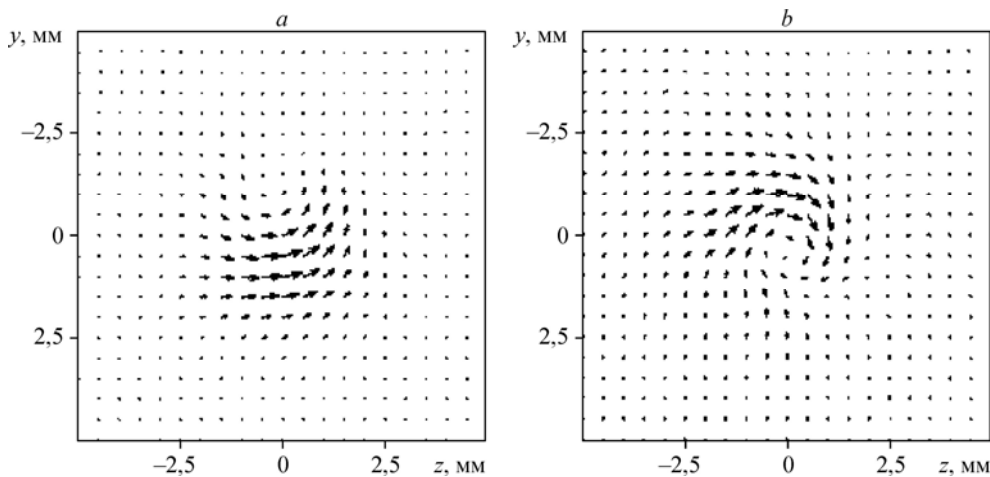


Рис. 13. Векторное поле скорости V в поперечном сечении $Y-Z$. a — на расстоянии 2 мм от катода, b — на расстоянии 2 мм от анода; $t = 299$ мс.

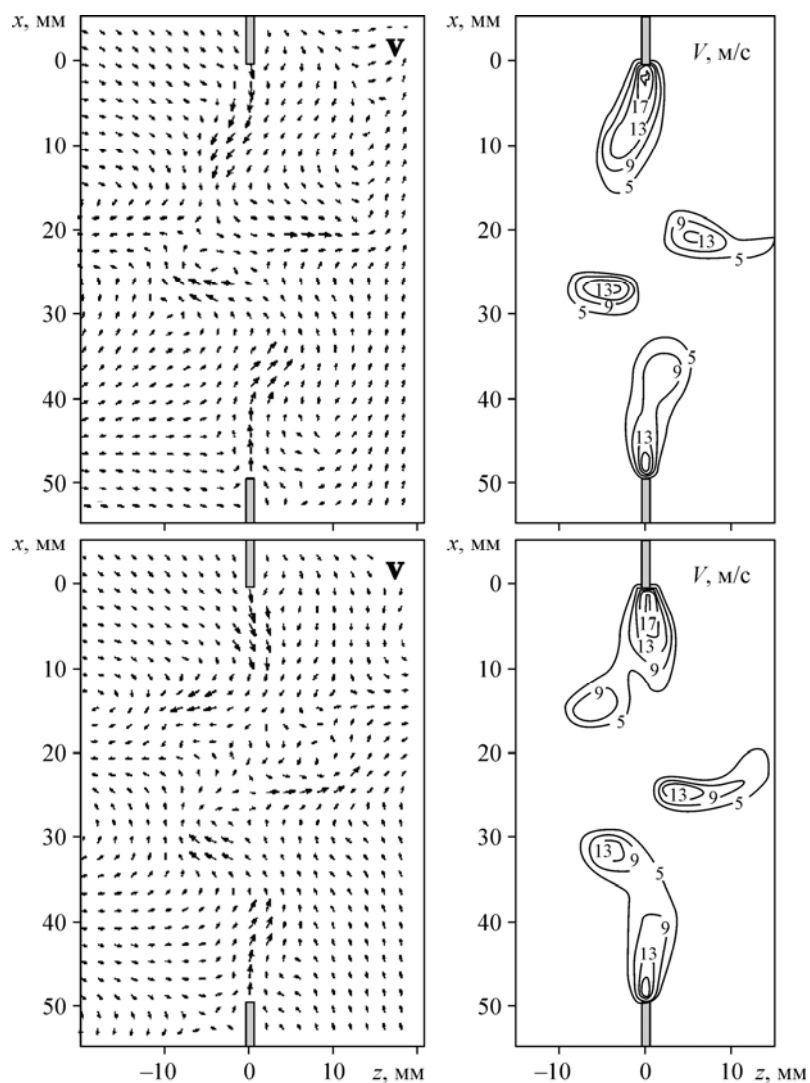


Рис. 14. Распределения векторного (V) и скалярного (V) поля скорости в вертикальных сечениях X - Y , X - Z , $t = 299$ мс.

расчета при значении временного шага $\tau = 10^{-5}$ с (аналог стационарной задачи) хорошо согласуются с результатами расчетов при $\tau = 10^{-5} - 10^{-4}$ с после выхода на стационарный режим.

Список литературы

1. Урусов Р.М., Урусова И.Р. Нестационарная трехмерная модель электрической дуги. Ч. 1. Математическая модель и результаты тестирования // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 1. С. 121–134.
2. Сердюк Г.Б. Экспериментальное исследование предела устойчивости сварочной угольной дуги в поперечном магнитном поле // Изв. Киевского политех. ин-та. 1954. 16. С. 90–99.
3. Меккер Г. Причины движения и смещения дуги // Тр. Ин-та инж. по электрон. и радиоэлектрон. 1971. Т. 59. № 4. С. 4–14.
4. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. Л.: Энергия, 1978. 160 с.
5. Леваков В.С., Любавский К.В. Влияние продольного магнитного поля на электрическую дуги с неплавящимся вольфрамовым катодом // Сварочное производство. 1965. № 10. С. 9–12.
6. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: ИЛ, 1961. 370 с.

7. **Ментель Ю.** Магнитная неустойчивость электрической дуги // Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. Новосибирск: Наука, 1977. С. 182–204.
8. **Пахомов Е.П.** Винтовая форма дуги, область существования и характеристики // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1979. № 3, вып. 1. С. 14–20.
9. **Мельникова Т.С., Попенко В.Г., Уланов И.М.** Влияние аксиального магнитного поля на электрическую дугу // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1979. № 3, вып. 1. С. 21–32.
10. **Синкевич О.А.** Нелинейная теория винтовой неустойчивости электрической дуги во внешнем магнитном поле // ДАН СССР. 1985. Т. 280, № 1. С. 99–101.
11. **Desyatkov G.A., Engelsht V.S., Gurovich V.Ts.** Dynamics of low-current discharge in external magnetic field // J. High. Chem. Proc. 1992. Vol. 1, № 3. P. 291–298.

Работа поступила в редакцию 6 ноября 2012 г.