

Попов С.Д.¹, Серба Е.О.¹, Суоров А.В.¹, Суоров А.В.^{1,2}

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, РФ

² БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, Санкт-Петербург, РФ

Вычислительное моделирование течения газа в канале генератора плазмы с полым электродом

Изучено формирование течения газа в канале и условия, оптимальные для устойчивого горения электрической дуги. Рассмотрены современные подходы к созданию мощных и недорогих в производстве генераторов плазмы. Эмпирически установлено, что изменение падения напряжения на дуге происходит вследствие изменения термо- и газодинамических режимов течения газа в канале. Для их расчета использован современный программный комплекс газодинамического и теплового моделирования, в котором проведены вычислительные эксперименты. Оценено влияние изменения суммарного расхода подаваемого газа на структуру течения. Сделаны выводы о влиянии теплообмена на напряженность электрического поля.

Ключевые слова: генератор плазмы, течение газа в канале, вычислительное моделирование.

Вивчено формування течії газу у каналі та умови, оптимальні для стійкого горіння електричної дуги. Розглянуто сучасні підходи до створення міцних та недорогих у виробництві генераторів плазми. Емпірично встановлено, що зміни падіння напруги на дузі відбувається внаслідок зміни термо- та газодинамічних режимів течії газу у каналі. Для їх розрахунку використано сучасний програмний комплекс газодинамічного та теплового моделювання, у якому проведено розрахункові експерименти. Оцінено вплив змін сумарних витрат газу, що подається, на структуру течії. Зроблено висновки про вплив теплообміну на напруженість електричного поля.

Ключові слова: генератор плазми, течія газу у каналі, розрахункове моделювання.

Глобальный экономический рост и прирост населения Земли обуславливают увеличение потребления энергии и рост совокупной массы отходов. В связи с этим все более актуальной становится разработка новых технологий переработки отходов с выработкой электроэнергии.

Перспективными способами решения этой задачи являются методы плазменной газификации и конверсии [1–4], направленные на получение синтез-газа из органосодержащих отходов, отходов деревообрабатывающей промышленности и сельского хозяйства. Для развития таких технологий требуется создание мощных и недорогих в эксплуатации генераторов термической плазмы с продолжительным ресурсом непрерывной работы [5].

Среди наиболее перспективных моделей плазмогенераторов, разработанных для использования в составе промышленных установок и обладающих продолжительным ресурсом работы, можно назвать плазмотроны постоянного тока типа MARC американской компании Westinghouse [6], плазмотроны Airspatial компании EUROPLASMA [7], и плазмотроны переменного тока, разработанные Институтом электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ) [8–11].

Использование многофазной (трехфазной) системы переменного тока, включающей дуги переменного тока, как основы электродугового плазмотрона позволяет создать простую, недорогую и надежную в эксплуатации систему энергопитания, а применение воздуха в качестве плазмообразующего газа позволяет существенно сократить расходы на эксплуатацию электродуговой плазменной системы.

В ИЭЭ РАН имеется большой опыт в разработке мощных многофазных электродуговых плазмотронов переменного тока, созданы мощные однокамерные электродуговые плазмотроны с электродами рельсового типа мощностью до 500 кВт [12, 13]. Увеличение мощности плазмотронов такого типа достигается за счет увеличения тока дуги при достаточно низком падении напряжения (около 200 В). Однако ресурс электродных узлов плазмотронов такого типа составляет 100 ч, что недостаточно для некоторых плазмохимических приложений.

Повышение мощности плазмотрона без ухудшения его ресурсных показателей возможно не при увеличении тока дуги, а при увеличении на-

пряжения на дуге. Плазмотроны переменного тока с дугами, горящими в длинных цилиндрических каналах, разработаны в ИЭЭ РАН [14–18]. В электродуговых плазмотронах такого типа изменение мощности регулируется не изменением тока, а изменением напряжения на дуге, которое, в свою очередь, зависит от изменения расхода плазмообразующего газа. При этом необходимо стремиться к достижению теоретически возможных значений падения напряжения для используемого источника питания. Так, для однофазной дуги переменного тока возможно падение напряжения на дуге 53 % от напряжения холостого хода источника питания, а для трехфазной электродуговой системы теоретически возможное падение напряжения составляет 33–35 %, что при холостом ходе источника питания 10000 В может превышать 3000 В. При работе плазмотрона на воздухе при атмосферном давлении напряженность в дуге находится в диапазоне 10–15 В/см, и длина дуги, падение напряжения в которой составляет 3000 В, должна превышать 200 см.

К настоящему времени в ИЭЭ РАН достигнута устойчивая работа экспериментального трехфазного плазмотрона переменного тока с дугами, горящими в длинных цилиндрических каналах. Падение напряжения на дуге в зависимости от расхода плазмообразующего газа представлено на рис.1.

При этом длина дуги остается постоянной и соответственно не может влиять на изменение напряженности электростатического поля, которая связана с плотностью тока и удельной проводимостью соотношением:

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{e^2 n_e}{2\sqrt{3m_e kT} \left(\sum_i n_i s_i + n_{ion} s_{ion} \right)},$$

где σ – проводимость; j – плотность тока, А/м²; E – напряженность электростатического поля, В/м; e – заряд электрона, Кл; n_e – концентрация электронов, 1/м³; m_e – масса электрона, кг; k – постоянная Больцмана, Дж/К; n_i , s_i – концентрация (1/м³) и сечение (м²) столкновения нейтральных компонентов плазмы; n_{ion} – концентрация ионов, 1/м³; s_{ion} – сечение кулоновских столкновений, м².

Так как длины дуги остаются приблизительно постоянными, можно сделать вывод, что с изменением соотношения расходов меняется проводимость дуги или плотность тока. Следовательно, изменение падения напряжения на дуге происходит вследствие изменения термо- и газодинамических процессов (режимов) течения

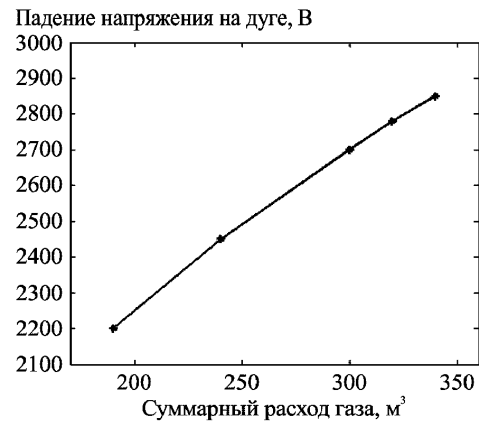


Рис.1. Зависимость напряжения на дуге от расхода плазмообразующего газа.

газа в канале. Требуется исследовать изменение картины течения в канале в зависимости от величины суммарного расхода газа. Для этого в первом приближении может быть рассмотрена холодная продувка и проведены вычислительные эксперименты.

Задача исследования течения газа в канале решалась в трехмерной стационарной постановке. Для решения был выбран подход, разработанный для высокоскоростных вязких сжимаемых потоков. При проведении расчета, помимо уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности, система дополнена уравнением энергии и набором эмпирических констант, сопровождающих подключение модели турбулентности ($\kappa - \epsilon$). В ходе вычислительных экспериментов были получены поля распределения термо- и газодинамических параметров.

Для решения рассматриваемой задачи в независимом сеточном генераторе была построена сетка, содержащая $2 \cdot 10^6$ тетраэдральных элементов. Для корректного разрешения она была сгущена в области вдувов. Расчет проводился в программном комплексе AnSys Fluent 14.0. Параметры на входных границах расчетной области вычислялись из законов сохранения. На рис.2 выделен набор сечений, поперечных к оси канала, в которых производилась визуализация течения.

Вычислительный эксперимент подтвердил наличие пристеночной кольцевой зоны пониженных значений скорости (около 10 м/с) (рис.3, а), размер и положение которой зависит от величины расхода газа (рис.4) и ее распределения между контурами подачи.

На рис.3 представлено поле модуля вращательной компоненты вектора скорости для суммарного расхода подаваемого газа 190 м³/ч. В окрестности оси симметрии канала линии тока газа закручены по спирали, значения модулей вектора скорости и его вращательной компонен-

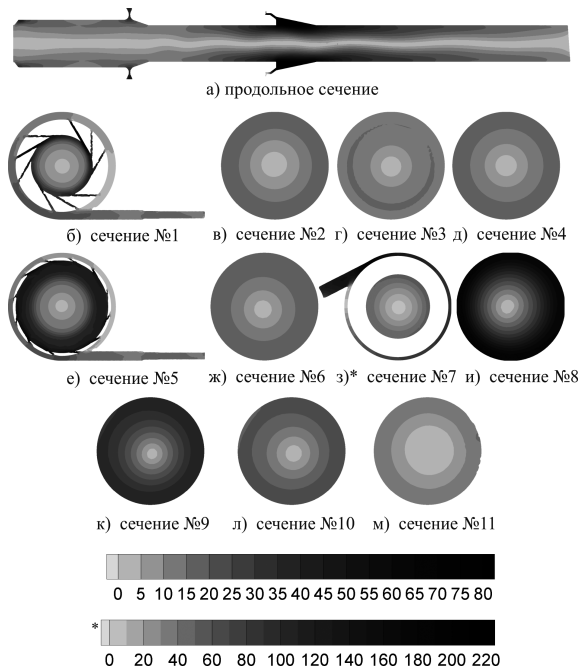
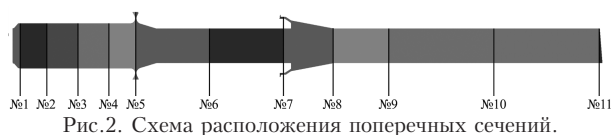


Рис.3. Поле модуля вращательной компоненты вектора скорости для расхода газа $190 \text{ м}^3/\text{ч}$.

ты близки к нулю. На рис.4 видно, что с увеличением суммарной величины расхода подаваемого газа эта область пониженных значений стягивается к оси симметрии канала. При этом скорости пристеночного течения в окрестностях сечений №№ 6–11 (см. рис.2) увеличиваются. Процесс сопровождается усилением возмущений, переносимых течением вверх по потоку от третьего вдува (рис.3, з) и существенным изменением картины течения в сопловой области. В области сечения № 7 (см. рис.2) наблюдается

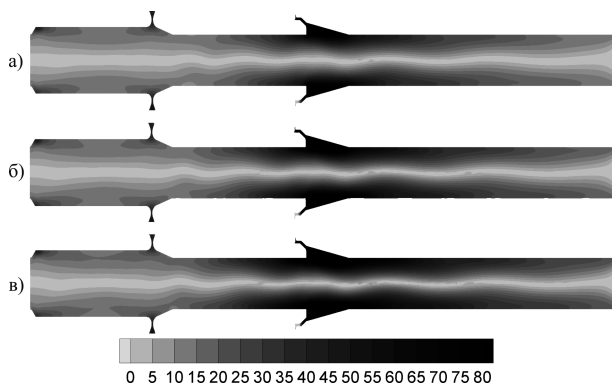


Рис.4. Сравнение полей модуля вращательной компоненты вектора скорости для расходов газа, $\text{м}^3/\text{ч}$: а – 190; б – 240; в – 300.

разгон потока до скоростей, варьирующихся по модулю в диапазоне $200\text{--}350 \text{ м/с}$ в зависимости от величины расхода газа.

Результаты расчета были получены при 5 %-й интенсивности турбулентности. Наибольшее влияние на изменение скорости потока оказывает третий вдув. В его области при высоких значениях суммарного расхода подаваемого газа реализуется звуковое течение, обусловленное геометрией канала. Вследствие разгона потока в этой области происходит существенное понижение температуры и давления. Аналогом такого течения является классическое газодинамическое течение в конфузоре.

Выводы

Наибольшие градиенты газо- и термодинамических параметров течения наблюдаются в поперечных сечениях канала в областях, непосредственно прилегающих ко вдувам. Увеличение пристеночной скорости при росте суммарного расхода газа затрудняет замыкание электрической дуги на корпус и способствует ее стабилизации вдоль оси симметрии. Расчеты показали, что при больших расходах газа поток более обжат и теплообмен «дуга – газ» происходит интенсивнее. Это может оказывать влияние на увеличение плотности тока. В приосевой области течения по всей длине канала осуществляется снижение тангенциальной скорости до значений меньше 5 м/с .

Список литературы

1. Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E. et al. Experimental development of methods on plasma gasification of coal as the basis for creation of liquid fuel technology // High temperature material processes. – 2009. – Vol. 13, № 2. – P. 147–154.
2. Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E. et al. Estimation of perspectivity of steam-plasma methane conversion // Ibid. – P. 241–246.
3. Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimtsev A.A. Arc gasification of biomass: Example of wood residue // High Temperature. – 2011. – Vol. 49, № 2. – P. 244–248.
4. Rutberg Ph.G., Bratsev A.N., Kuznetsov V.A. et al. On efficiency of plasma gasification of wood residues // Biomass and Bioenergy. – 2011. – Vol. 35, № 1. – P. 495–504.
5. Rutberg P. Physics and Technology of High-Current Discharges in Dense Gas Media and Flows. – New York : Nova Science Publishers, 2009.
6. Westinghouse Plasma – Plasma Torches. – <http://www.westinghouse-plasma.com/technology/plasma-torches>.
7. Hacala A., Michon U. Innovative industrial plasma torch for converting biomass into high purity syngas // PROCEEDINGS of ISPC19. – Bochum, Germany, 2009. – 39 P2.14.04.

8. Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Попов С.Д. и др. Многофазные электродуговые плазмотроны переменного тока для плазменных технологий // Теплофизика высоких температур. — 2006. — Т. 44, № 2. — С. 205–211.
9. Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Наконечный Г.В. и др. Плазмотроны переменного тока со стержневыми электродами мощностью от 5 до 50 кВт для плазмохимических приложений // Изв. вузов. Физика. — 2007. — № 9. Прилож. — С. 77–79.
10. Никонов А. В., Овчинников Р.В., Павлов А.В. и др. Однофазный плазмотрон переменного тока как источник низкотемпературной воздушной плазмы атмосферного давления // Там же. — 2008. — Т. 51, № 11/3. — С. 25–30.
11. Rutberg Ph.G., Lukyanov S.A., Kiselev A.A. et al. Investigation of parameters of the three phase high-voltage alternating current plasma generator with power up to 100 kW working on steam // J. Phys. : Conf. Ser. — 2011. — Vol. 275. — 012006.
12. Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Popov S.D. et al. Multiphase Stationary Plasma Generators Working on Oxidizing Media // Plasma Physics and Controlled Fusion, Bristol, Institute of Physics and IOP Publishing Limited. — 2005. — Vol. 47. — P. 1681–1696.
13. Popov S.D., Rutberg A.F., Safronov A.A. The Use of AC Plasma Generators for Operation as a Part of Plasma Reactor : Special Features // High Temperature. — 2007. — Vol. 45, № 1. — P. 1–6.
14. Rutberg Ph.G., Gorbunov V.P., Nakonechny Gh.V. et al. Investigation of process dynamic of an electric arc burning in single-phase AC plasma generators // V Intern. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology (PPPT-5), contributed papers, (Minsk, Belarus, Sept. 18–22, 2006). — Minsk : Institute of Molecular and Atomic Physics NAS of Belarus, 2006. — Vol. 1. — P. 110–113.
15. Rutberg Ph.G., Kumkova I.I., Kuznetsov V.E. et al. High-Voltage Plasma generators of Alternating Current with Rod Electrodes Stationary Operating on Oxidizing media // 2007 IEEE Pulsed Power Conference (PPPS-2007) Digest of Technical Papers 1976-2007, IEEE Catalog Number 07CH37864C, Albuquerque, New Mexico, USA. — June 17–20, 2007. — P. 1556–1559.
16. Rutberg Ph.G., Gorbunov V.P., Kushev S.A. et al. Characteristic Features of Operation of High-Voltage Electric Arc Plasma Generators with Rod Electrodes and Power from 5 up to 50 kW in a Pilot Plasmachemical Unit // Ibid. — P. 1560–1564.
17. Rutberg Ph.G., Popov S.D., Safronov A.A. et al. High-Voltage Alternating Current Plasma Generators with Power up to 50 kW for Plasmachemical Applications // XXVIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG 2007), Prague, Czech Republic, July 15–20, 2007. — Prague, 2007. — P. 1762–1765.
18. Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Surov A.V., Popov S.D. Alternating Current Electric Arc Plasma Generators // Ibid. — P. 1774–1777.

Поступила в редакцию 20.07.12

Popov S.D.¹, Serba E.O.¹, Surov A.V.¹, Surov A.V.^{1,2}

¹ Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St.-Petersburg, Russia

² BSTU «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, St.-Petersburg, Russia

Computational Simulation of Gas Flow in Plasma Generator Channel with Hollow Electrode

Gas flow formation in channel and conditions those are optimal for stable arc burning is investigated. Modern approaches to the creation of powerful and inexpensive in production plasma generators are considered. It is empirically determined that arc voltage drop varies due to changing of thermal and gas-dynamic gas flow modes in the channel. Modern software system for gas-dynamic and thermal simulation is applied for the regimes calculation in which computational experiments are carried. The influence of total flow rate variation of supplied gas on the flow structure is evaluated. The conclusions about heat exchange influence on electric field strength are drawn.

Key words: plasma generator, gas flow in channel, computational simulation.

Received July 20, 2012