

## ФИЗИКА

УДК 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-1-60–70

Ю.М. Куликов<sup>1</sup>, М.Х. Гаджиев<sup>1</sup>, Д.В. Савицкий<sup>1</sup>, Э.Е. Сон<sup>1,2</sup>

### Расходные характеристики межэлектродного зазора газового тракта генератора низкотемпературной плазмы

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; [kulikov-yurii@yandex.ru](mailto:kulikov-yurii@yandex.ru);

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (НИУ); 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

Генераторы низкотемпературной плазмы нашли своё применение в различных промышленных технологиях и научных исследованиях. Кроме того, самостоятельную ценность представляет непосредственное изучение тепломассообмена и электрофизических характеристик таких устройств. В силу большой сложности протекающих процессов, основная масса исследований носит экспериментальный характер, тогда как численному моделированию газового тракта плазмотрона отводится вспомогательная роль. Вместе с тем, численный расчет способен дать представления о полях скорости и давления на участках газового тракта, где такое измерение затруднено.

В статье представлены результаты моделирования расходных характеристик межэлектродного зазора без разряда – одного из участков газового тракта плазмотрона. Моделирование проводится в программе COMSOL Multiphysics. Проведен тестовый расчет течения Пуазейля на сетках с различным числом ячеек в канале

Результаты моделирования течения на участке круглой трубы свидетельствуют о монотонности процесса сеточной сходимости. Полученная зависимость массового расхода в межэлектродном зазоре плазмотрона от перепада давления на участке 5-15360 Па имеет логарифмическую форму, а максимальная скорость на выходе из зазора может достигать 180 м/с (а число Маха  $M \sim 0.5$ ). Сравнение с результатами расчета в программном комплексе FlowVision показывает, что расхождение асимптотических расходов, реализующихся в численных моделях, не превышает 7.8 %.

Ключевые слова: генератор низкотемпературной плазмы, плазмотрон, газовый тракт, вычислительная гидродинамика, расходная кривая, сеточная сходимость.

## Введение

Низкотемпературная плазма находит широкое применение в науке и технике, различных промышленных технологиях, таких как плазменная металлургия, обработка материалов (резка, сварка, наплавление, модификация поверхности), осуществление плазмохимических реакций, переработка различных отходов, испытания ракетной техники и теплозащитных покрытий, а также медицина [1–8].

Наличие богатейшего опыта экспериментальных исследований, тем не менее, оставляет множество вопросов, связанных с достоверным определением гидродинамических и тепловых режимов работы генераторов низкотемпературной плазмы. Следует

обратить внимание, что измерение интегрального теплового потока в различные секции плазмотрона, а также спектроскопические измерения температуры [9] в дуговом канале не позволяют детально рассмотреть характер теплопередачи в высокотемпературном пограничном слое газового тракта плазмотрона, – столь важный для инженерной практики и теории тепломассообмена.

Моделирование течения газа и плазмы в канале плазмотрона представляет собой сложную вычислительную задачу, так как связано с необходимостью одновременного учета влияния электрофизических процессов, излучения и химических реакций на тепломассообмен. Целесообразно создать иерархию моделей, описывающих (с той или иной точностью) процессы в данном устройстве. Какой бы сложности ни рассматривались модели химических реакций или переноса излучения, в основе иерархии всегда будут лежать уравнения движения сплошной среды (неразрывности, Навье–Стокса и энергии) [10]. Таким образом, перед рассмотрением течений с интенсивным теплообменом следует определить поля скоростей и давлений при «холодной продувке» плазмотрона. Противном случае, отсутствие согласования между перепадом давления в течении и вводимой тепловой мощностью в движущийся газ может привести к серьезным ошибкам расчета теплового поля даже с учетом зависимости теплоемкости и теплопроводности от температуры вследствие диссоциации и ионизации [11]. Сложность системы газовых каналов в корпусе плазмотрона затрудняет измерение распределения давления выше участка горения дуги, таким образом, актуальным является построение расходной кривой в зависимости от перепада давления. Решение обратной задачи позволит определить приблизительное давление в труднодоступных участках газового тракта.

Основные потери давления будут происходить межэлектродном зазоре, где наблюдается сходящееся движение жидких частиц (встречное движение газовых струй). Расход через зазор не может превышать расхода через систему «зазор + канал выходного электрода».

Расчет течения в газовом тракте плазмотрона проводится с помощью программы COMSOL Multiphysics, использующей метод конечных элементов [12]. Данный пакет позволяет проводить моделирование задач механики жидкости и газа, сопряженного теплообмена, электрофизики, переноса излучения, выполнять построение сложных физических моделей.

### Расчет течения Пуазейля на различных сетках

Рассмотрим вначале элементарную задачу о течении Пуазейля в канале постоянного сечения в зависимости от числа ячеек расчетной сетки. Автоматическая процедура генерации расчетной сетки оказывается не очень удачной и не может дать требуемых значений осевой скорости, поэтому приходится проводить разбиение сетки вручную.

Модельная жидкость имеет плотность  $\rho=2 \text{ кг/м}^3$ , динамическую вязкость  $\mu=2\text{e}^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Расчетная область представляет собой цилиндр радиусом 2 мм, высотой (длиной) 10 мм (2.5 калибра – см. рис. 1).

Рассматривается движение несжимаемой жидкости:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{u}) I \right) + \vec{F},$$
$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0,$$

где  $\vec{u}$  – вектор скорости,  $p$  – давление,  $I$  – единичная матрица,  $\vec{F}$  – вектор объемной силы,  $t$  – время, совместно с прилипанием жидких частиц на стенках круглой трубы. Ре-

ференсное давление – 1 атм. На входе ставится условие для статического давления, задаваемое как  $p = 10(1 - e^{-4t})$  [Па]. На противоположной границе задается условие свободного выхода. Время процесса – 2 с.

Параметры расчетной сетки, на которой проводился расчет, а также асимптотические значения максимальной скорости на оси и расхода представлены в таблице 1. Цветовая диаграмма распределения скорости для самой грубой сетки приведена на рис. 2.

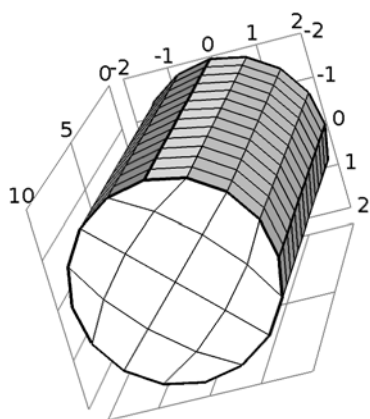


Рис. 1. Характерный вид расчетной сетки для расчета течения Пуазейля в канале

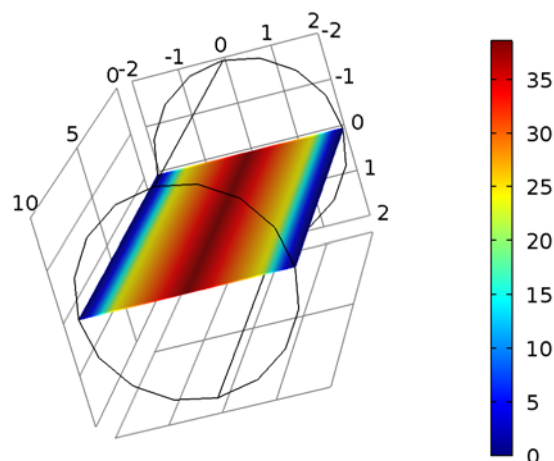


Рис. 2. Характерное распределение скорости

**Таблица 1. Сводные данные по расчету течения Пуазейля**

Число ячеек в поперечном сечении	16	49	64	144	225	484	1225	3721
Общее число ячеек расчетной сетки	208	980	1600	5472	10800	32912	133525	718153
Минимальное качество элемента	0.02766	0.00376	0.00205	4.15e-4	1.70e-4	3.86e-5	6.04e-6	6.48e-7
Среднее качество элемента	0.5118	0.5978	0.5733	0.5853	0.5918	0.6026	0.6067	0.6066
Количество шестигранных элементов	208	980	1600	5472	10800	32912	133525	718153
Количество четырехугольных элементов	240	658	928	2112	3330	6952	17710	54534
Количество граничных элементов	84	136	164	248	312	448	716	1260
Количество элементов-вершин	8							
Асимптотический расход	4.58e-4	3.29e-4	3.55e-4	4.67e-4	5.26e-4	6.01e-4	6.37e-4	6.01e-4
Максимальная скорость (на оси)	38.61	21.58	26.68	38.59	42.73	48.8	50.97	48.8

Важным параметром является так называемое качество элемента сетки – безразмерная величина, варьирующаяся в пределах от 0 (для вырожденного элемента) до 1 (для регулярного элемента), и являющаяся функцией соотношения сторон. Отметим, что согласно классической формуле Пуазейля скорость на оси должна составлять 50 м/с при данном перепаде давления.

Изучение зависимости поля скорости, а также расходных характеристик от давления при различном числе расчетных ячеек в межэлектродном зазоре.

Моделирование течения проводилось как по уравнениям для несжимаемой жидкости, указанным выше, так и с учетом сжимаемости, которая начинает играть существенную роль при увеличении скорости потока:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{u}) I \right) + \vec{F},$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0.$$

Диаметр выходного отверстия зазора составляет 4 мм, диаметр верхней и нижней окружностей, ограничивающих поверхность входа, составляет 4 и 4,4 мм соответственно. Высота расчетной области на оси симметрии составляет 0.3 мм. Ширина межэлектродного зазора не превышает 0.82 мм. Расчет течения проводился на последовательности сеток с автоматическим измельчением согласно встроенным параметрам COM-SOL Multiphysics:

1. «очень редкая сетка» – «Coarser»,
2. «редкая сетка» – «Coarse»,
3. «нормальная сетка» (размер ячеек определяется по умолчанию) – «Normal»,
4. «мелкая сетка» – «Fine»,
5. «мелкая сетка», с двукратным сжатием по оси Z (по вертикали) – «FineZScale2»,
6. «мелкая сетка», с трехкратным сжатием по оси Z – «FineZScale3».

Построение расчетной сетки проводится автоматически согласно Общим настройкам размеров сетки (табл. 2), а также специальным (табл. 3) – задаваемым на стенках (рис. 3а), поверхности входа (рис. 3б), выхода (рис. 3в), а также в объеме расчетной геометрии. При этом на мелких сетках для повышения точности расчета вводятся пограничные слои (2 слоя). Общий вид расчетной сетки приведен на рис. 3г.

**Таблица 2. Общие настройки размеров сетки**

Максимальный размер элемента	0.84
Минимальный размер элемента	0.151
Множитель кривизны	0.6
Разрешение узких областей	0.5
Максимальная скорость увеличения элемента	1.5

**Таблица 3. Таблица параметров сетки для изучения сеточной сходимости при  $p = 1280$  Па**

Статистика по сетке	1280 Па, Coarser	1280 Па, Coarse	1280 Па, Normal	1280 Па, Fine	1280 Па, FineZScale2	1280 Па, FineZScale3
Учет сжимаемости	нет	нет	нет	нет	нет	нет
Количество элементов сетки	12590	24670	75345	159198	283301	411545

Минимальное качество элемента сетки	0.003108	0.006284	0.005053	0.008357	0.002971	0.00125
Среднее качество элемента сетки	0.4529	0.4873	0.5	0.5698	0.4295	0.267
Тетраэдрические элементы	8050	17474	59307	132198	254765	380227
Пирамидальные элементы	184	225	324	495	486	555
Призматические элементы	4356	6971	15714	26505	28050	30763
Треугольные элементы	2040	3096	6893	11549	13889	16796
Четырехугольные элементы	332	428	644	812	812	812
Граничные элементы	262	331	484	621	656	687
Элементов-вершины	14					
<b>Неструктурированная треугольная – выход</b>						
Область исследования	МЖГ					
Максимальный размер элемента	0.461	0.355	0.238		0.188	
Минимальный размер элемента	0.142	0.106	0.071		0.0355	
Множитель кривизны	0.8	0.7	0.6		0.5	
Разрешение узких областей	0.5	0.6	0.7		0.8	
Максимальная скорость увеличения элемента	1.25	1.2	1.15		1.13	
Условное обозначение размера	Coarser	Coarse	Normal		Fine	
<b>Неструктурированная треугольная – вход</b>						
Область исследований	МЖГ					
Максимальный размер элемента	0.461	0.355	0.238		0.188	
Минимальный размер элемента	0.142	0.106	0.071		0.0355	
Множитель кривизны	0.8	0.7	0.6		0.5	
Разрешение узких областей	0.5	0.6	0.7		0.8	
Максимальная скорость увеличения элемента	1.25	1.2	1.15		1.13	
Условное обозначение	Coarser	Coarse	Normal		Fine	

Неструктурированная тетраэдрическая					
Область исследований	МЖГ				
Максимальный размер элемента	0.461	0.355	0.238	0.188	0.188
Минимальный размер элемента	0.142	0.106	0.071	0.0355	0.0355
Множитель кривизны	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5
Разрешение узких областей	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8
Максимальная скорость увеличения элемента	1.25	1.2	1.15	1.13	1.13
Условное обозначение	Coarser	Coarse	Normal	Fine	
Пограничные слои	2 слоя вдоль стенок				

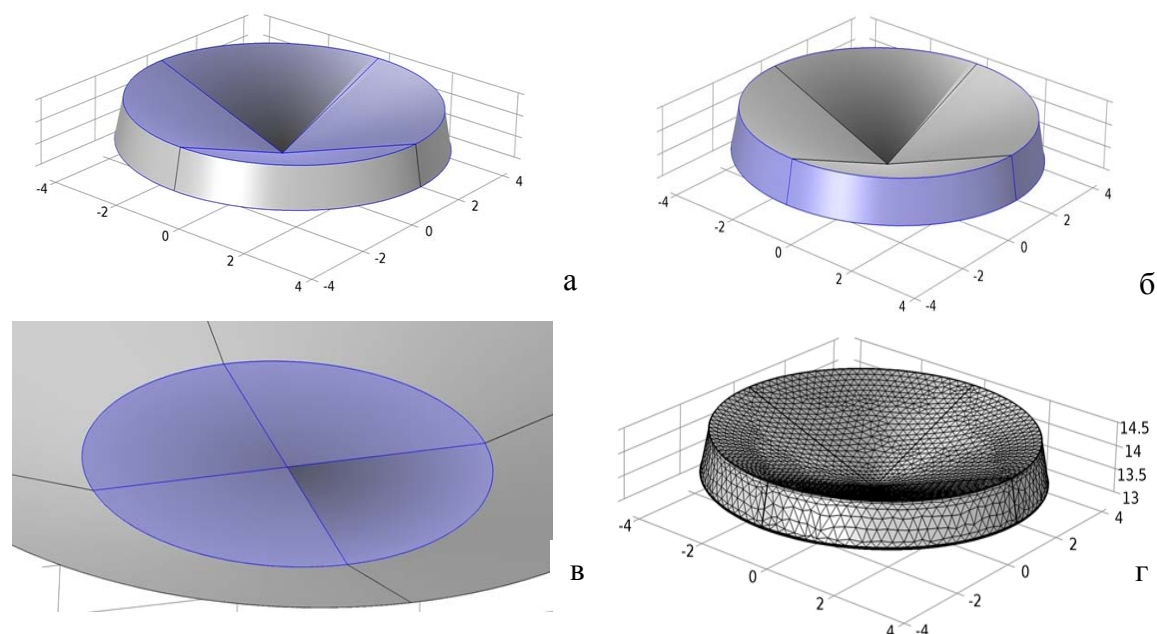


Рис. 3. Границы на которых задается условие: *а* – прилипания жидких частиц; *б* – давления (вход); *в* – свободного выхода; *г* – общий вид расчетной сетки

На рис. 4 представлена характерная зависимость массового расхода от типа расчетной сетки, отмеченной соответствующими обозначениями. Число ячеек не указывается непосредственно, так как использованная сетка является структурно более сложной в сравнении с прямоугольными сетками.

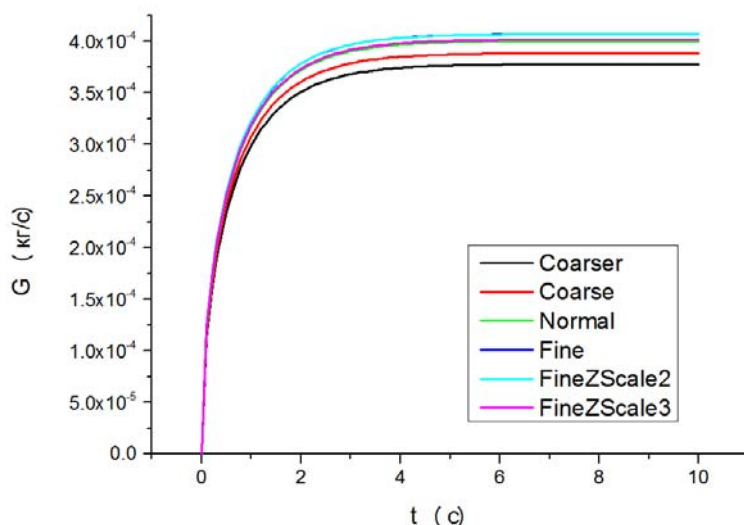


Рис. 4. Зависимость массового расхода от времени для  $p = 1280$  Па

Форма кривой массового расхода определяется условием для давления на входной границе, а асимптотическое значение расхода при увеличении числа ячеек расчетной сетки растет до расчета на мелкой сетке с двукратным сгущением в направлении  $Z$  (в вертикальном направлении) и уменьшается для последней сетки. Интегральный массовый расход  $G$  (рис. 5) является важнейшей характеристикой, которая наряду с энерговкладом (получаемым из вольт-амперной характеристики) определяет режим течения для данного газа. Исходя из формы кривой на участке  $0 \div 1.6$  г/с, можно говорить о логарифмической зависимости расхода от давления. Следует отметить относительно небольшой разброс значений при расчете на различных сетках.

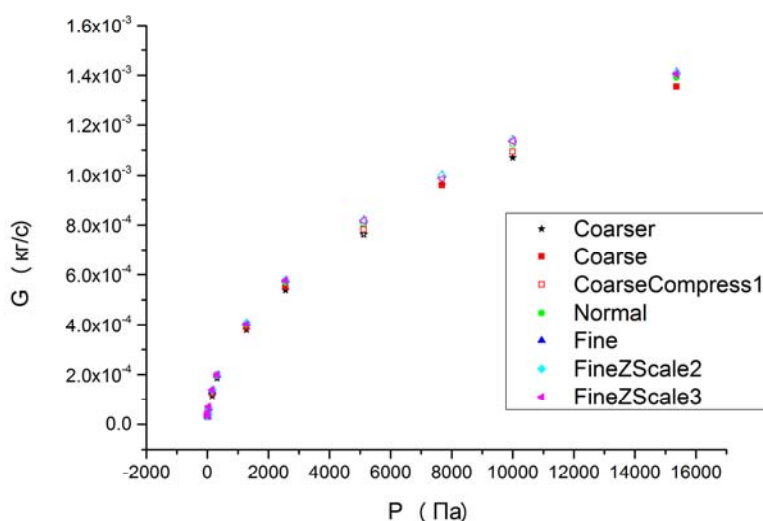


Рис. 5. Зависимость расхода азота от перепада давления на различных сетках. Цифры в легенде обозначают количество ячеек в расчетах FlowVision

Схожую зависимость демонстрирует и скорость (рис. 6), при этом с повышением давления  $V$  переходит в зону, где сжимаемость газа начинает играть существенную роль  $M > 0.1$ .

Полученные расходные характеристики сравнивались с результатами расчета течения в программном комплексе FlowVision [13, 14] на основе автоматически построенной прямоугольной сеточной модели. Размеры сетки подобраны таким образом, чтобы исходная ячейка была кубом, но особенностью FlowVision является то, что ячейки на границе среды отсекаются этой границей и становятся многогранниками. Для трехмерной постановки размер ячейки составлял 0.1 мм.

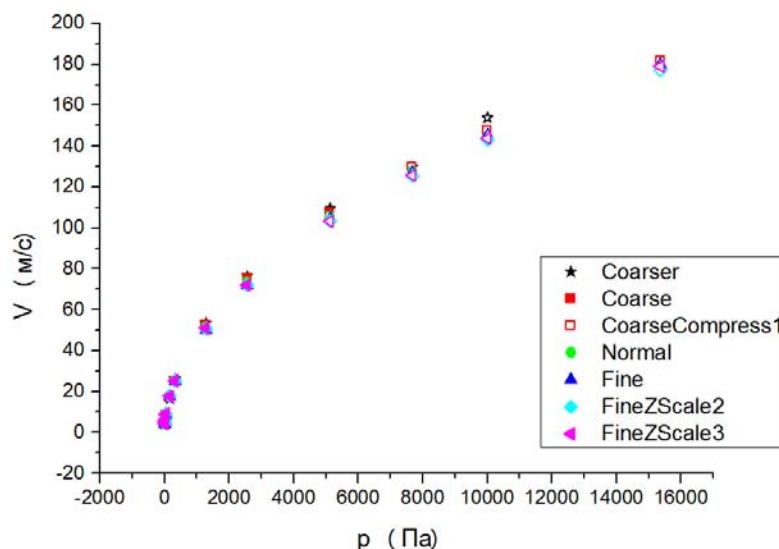


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости на выходе из зазора от перепада давления на различных сетках

Для ускорения расчетов из исходной геометрии был вырезан клин (длина дуги  $4^\circ$ ), с установкой соответствующих граничных условий симметрии, что сводит исходную трехмерную постановку к квазидвумерной. Для исследования сеточной сходимости использовалась последовательность из трех расчетных сеток – 17660 (0.025 мм), 352120 (0.0125 мм), 704240 (0.00625) ячеек, – в скобках указан максимальный размер ячейки. Результаты по асимптотическим значениям расходов приведены в таблице 3, там же указана величина, полученная в Comsol Multiphysics.

Сравнивая значения асимптотического расхода, оценим величину расхождения результатов COMSOL Multiphysics и FlowVision: для перепада давления 10 Па оно составило 5.4 %, а для перепад 15360 Па – 7.8 %, что говорит о достаточно хорошем совпадении результатов двух численных моделей.

### Заключение

Результаты численных исследований позволили получить расходную кривую в зависимости от давления в зазоре, которая показывает, что расходы порядка  $1 \div 1.5$  г/с достигаются при давлении  $8 \cdot 10^3 \div 1.6 \cdot 10^4$  Па. В этом же диапазоне реализуются течения газа с существенным влиянием сжимаемости (скорость до  $v \sim 180$  м/с на выходе из зазора, соответствующая числу Маха  $M \sim 0.5$ ). В диапазоне  $p = 5 \div 160$  Па (несжимаемое или слабосжимаемое течение) процесс сходимости является монотонным и использо-



вание сеток, сжатых по оси  $Z$  в 2–3 раза («FineZScale2», «FineZScale3») позволяет получить значения с точностью 5 %. В то же время при расчете течения с влиянием сжимаемости процесс сеточной сходимости является не монотонным, так как расход на более подробных сетках оказывается меньшим в сравнении с более грубыми (рис. 7, 8). Сравнение с расчетами, выполненными в программном комплексе FlowVision, что в исследованном диапазоне перепадов давления расхождение значений не превышает 7.8 %.

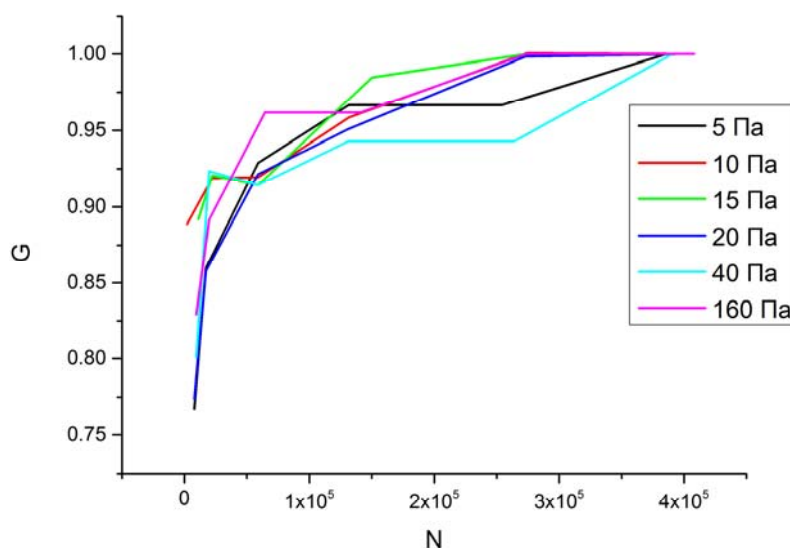


Рис. 7. Асимптотическое значение расхода газа, нормированное на значение, полученное на самой мелкой сетке для диапазона давлений  $p = 5 \div 160$  Па

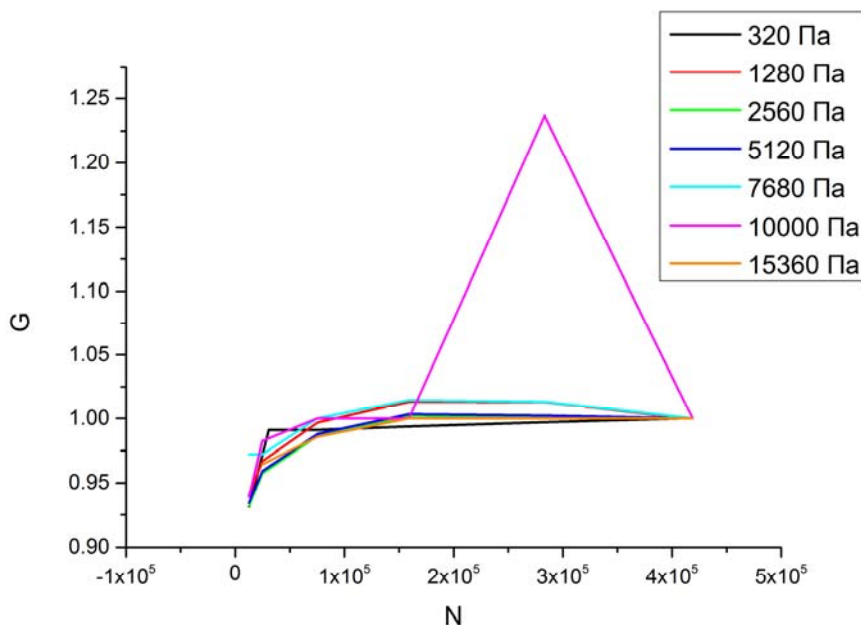


Рис. 8. Расход, нормированный на значение, полученное на самой мелкой сетке для диапазона давлений  $p = 320 \div 1536$  Па

**Таблица 4. Сеточная сходимость расчетов FlowVision и сравнение результатов**

p, Па/Н	17660	352 120	704 240	COMSOL Multiphysics	Расхождение
10	3.57E-05	3.55E-05	3.53E-05	3.35E-05	5.40 %
15360	0.00168	0.00152	0.00152	0.00141	7.80 %

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 18-29-24203 мк и 19-08-00484.

### Литература

1. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. – 379 с.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – 3-е изд. – М.: Интеллект, 2009. – 736 с.
3. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
4. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен, термохимическое и термозрозионное разрушение тепловой защиты. – М.: Янус-К, 2011. – 520 с.
5. Краснов А.Н., Шаривкер С.Ю., Зильберберг В.Г. Низкотемпературная плазма в металлургии. – М.: Металлургия, 1970. – 215 с.
6. Филиппов Г.А., Тюфтяев А.С., Гаджиев М.Х., Юсупов Д.И. Влияние стабилизации температуры стали в промежуточном ковше УНРС плазменным способом на механические свойства НЛЗ после прокатки // Металлург. – 2016. – № 3. – С. 49–53.
7. Тюфтяев А.С., Гаджиев М.Х., Ильичев М.В., Хромов М.А., Филиппов Г.А. Азотирование высоколегированной стали при плазменно-дуговом переплаве // Металлург. – 2019. – № 2. – С. 37–41.
8. Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Исакаев Э.Х., Демиров Н.А. Генератор низкотемпературной воздушной плазмы для исследования взаимодействия плазменной струи с термостойкими материалами // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер.: Естественные науки. – 2018. – Вып. 1. – С. 50–56.
9. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2010. – 472 с.
10. Pozrikidis C. Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics. – 2<sup>nd</sup> ed. – New York: Oxford University Press, Inc., 2011. – 1243 p.
11. Yusupov D.I., Kulikov Yu.M., Gadzhiev M.Kh., Tyuftyaev A.S. Son E.E. High-pressure ignition plasma torch for aerospace testing facilities // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – № 774. – P. 012185.
12. Introduction to COMSOL Multiphysics 3.5. – 168 p.
13. Аксёнов А.А. FlowVision: Индустриальная вычислительная гидродинамика // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 5–20.
14. Жлуктов С.В., Аксёнов А.А., Савицкий Д.В. Высокореинольдсовы расчеты турбулентного теплопереноса в программном комплексе FlowVision // Компьютерные исследования и моделирование. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 461–481.

Поступила в редакцию 2 октября 2019 г.

UDC 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-1-60–70

## The Rating Curve for an Interelectrode Gap of Low-Temperature Plasma

*Y.M. Kulikov<sup>1</sup>, M.Kh. Gadzhiev<sup>1</sup>, D.V. Savitskiy<sup>2</sup>, E.E. Son<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT); Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13, bld. 2; [kulikov-yurii@yandex.ru](mailto:kulikov-yurii@yandex.ru);*

<sup>2</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology; Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy per. 9;*

Low-temperature plasma generators are widely used in various industrial technologies and scientific research. In addition, the direct investigation of heat and mass transfer and the electrophysical characteristics of such devices is a separate, but equal field of studies. Due to the great complexity the research is mostly experimental, while numerical modeling of the gas path of the plasma torch has an auxiliary role. At the same time, the numerical calculation is able to provide information on the velocity and pressure distributions in the gas duct portions where such measurements are difficult.

The paper presents the results of modeling the rating characteristics of the interelectrode gap, being one of the sections of the gas path of the plasma torch without electric arc (“cold start”). Modeling is carried out in the COMSOL Multiphysics program. Firstly, the classical Poiseuille flow on grids with a different number of cells in the channel has been tested. The results of modeling the flow in the round pipe section indicate the non-monotonicity of the grid convergence process. The obtained dependence of the mass flow rate in the interelectrode gap of the plasma torch on the pressure drop in the region 5-15360 Pa has a logarithmic form, while the maximum velocity at the gap outlet can reach 180 m/s (and the Mach number  $M \sim 0.5$ ). Comparison with the calculation results to FlowVision software package shows that the discrepancy in the asymptotic flow rates obtained in two numerical models does not exceed 7.8 %.

**Keywords:** *low-temperature plasma generator, plasma torch, gas path, computational fluid dynamics, rating curve, grid convergence.*

*Received 2 October 2019*