

УДК 533.6.011.8

ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ ПОТОКА НА ДОЗВУКОВУЮ СТРУЮ ВОЗДУХА В ВЧ-ПЛАЗМОТРОНЕ ВГУ-4

© 2024 г. С. А. Васильевский, А. Ф. Колесников*

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

**e-mail: koles@ipmnet.ru*

Поступила в редакцию 01.06.2024 г.

После доработки 11.06.2024 г.

Принята к публикации 11.06.2024 г.

Исследовано влияние учета закрутки потока при расчете обтекания цилиндрической модели диаметром 50 мм дозвуковой струей воздушной плазмы, истекающей из разрядного канала в испытательную камеру ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 ИПМех РАН. Проведено сравнение расчетов осесимметричного обтекания модели на основе полных уравнений Навье—Стокса с учетом (новые результаты) и без учета (старые результаты) тангенциальной компоненты скорости w для условий экспериментов при давлении 80 мбар в широком диапазоне мощности по анодному питанию, для различных значений расстояния от среза канала плазмотрона до модели. Показано, что при расчете для малой мощности плазмотрона ВГУ-4 с учетом закрутки потока картина обтекания лобовой части модели меняется: вместо относительно тонкого пограничного слоя перед моделью образуется вихревая область. Для умеренной и большой мощности плазмотрона влияние учета закрутки на изолинии безразмерной функции тока и на изотермы мало в области ядра струи перед моделью, но является значительным во внешней области течения в испытательной камере.

Ключевые слова: ВЧ-плазмотрон, численное моделирование, дозвуковая струя, закрутка потока, диссоциированный воздух.

DOI: 10.31857/S1024708424050119 **EDN:** NQGGVA

Численное моделирование высокоэнтальпийных дозвуковых потоков газов в ВЧ-плазмотроне, являясь необходимым дополнением экспериментальных исследований, позволяет оценить параметры, недоступные для прямого измерения, например, энтальпию и скорость потока, концентрации компонентов диссоциированной смеси газов [1, 2]. Совместное использование экспериментальных данных и результатов расчетов позволяет определить каталитические свойства поверхностей образцов различных материалов, испытываемых в струях индукционных плазмотронов [2–5]. Для численного исследования течений плазмы в разрядных каналах ВЧ-плазмотронов и последующего струйного обтекания моделей были разработаны различные компьютерные программы, при этом в зависимости от режима работы плазмотрона использовались равновесные или неравновесные модели плазмы [1, 6–10]. В данной работе применяется разработанная в ИПМех РАН методика [1], в которой задача численного моделирования разделена на три части, соответствующие трем основным областям течения в ВЧ-плазмотроне ВГУ-4: 1) течение в разрядном канале; 2) обтекание модели дозвуковой струей, истекающей из разрядного канала в испытательную камеру плазмотрона; 3) пограничный слой на оси симметрии перед передней критической точкой модели. Предполагается, что в областях 1 и 2 течения равновесные, а течение в области пограничного слоя 3 — химически неравновесное. Во всех трех областях течение предполагается стационарным и ламинарным. Для расчета течений в этих трех областях разработаны компьютерные программы Alpha, Beta и Gamma [1].

В стандартном варианте программы Beta используется дополнительное предположение о том, что тангенциальная компонента скорости w равна нулю в области испытательной камеры плазмотрона, хотя в программе Alpha учитываются все три компоненты скорости — продольная u , радиальная v и тангенциальная w . В этом предположении, т.е. без учета w , проводились многочисленные расчеты, например

[2], и исследовался тепловой эффект гетерогенного катализа для различных материалов, испытываемых в дозвуковых струях высокоэнтальпийных газов. В данной работе программа Beta модифицирована для учета закрутки потока, т.е. ненулевой тангенциальной компоненты скорости w , и с ее помощью получены оценки влияния закрутки на основные параметры течения и теплообмена для условий экспериментов на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 (уникальная научная установка Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН “Высокочастотные индукционные плазмтроны ВГУ-3 и ВГУ-4”, <https://ipmnet.ru/uniquequip/plasma/>, <https://ckp-rf.ru>).

1. РАСЧЕТ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ ДОЗВУКОВОЙ СТРУЕЙ ВОЗДУХА С УЧЕТОМ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

Рассматривается обтекание цилиндрической водоохлаждаемой модели равновесной дозвуковой струей диссоциированного воздуха, истекающей из разрядного канала ВЧ-плазмотрона ВГУ-4, для условий экспериментов: давление у стенки испытательной камеры $P = 80$ мбар, диапазон мощности ВЧ-генератора по анодному питанию $N_{ap} = 20 - 70$ кВт, соответствующие значения мощности, вкладываемой в плазму, $N_{pl} = 12.0 - 43.7$ кВт. Модель имеет диаметр 50 мм, закругленную кромку с радиусом закругления 11 мм (евромодель) и устанавливается на расстоянии Z_m от среза канала, разрядный канал и модель имеют общую ось, так что задача имеет цилиндрическую симметрию. Расход воздуха в разрядном канале во всех случаях 2.4 г/с.

Исходные данные для расчета обтекания модели получены в результате расчетов равновесного течения плазмы воздуха в разрядном канале плазмотрона ВГУ-4 по программе Alpha для всех режимов. Во всех случаях рассматривался цилиндрический канал диаметром 80 мм без насадков; детали расчета по программе Alpha приведены, например, в [1, 2]. Полученные для каждого режима радиальные профили параметров плазмы на выходе из разрядного канала, включая три компоненты скорости, используются далее для задания граничных условий при расчете дозвуковой закрученной струи во 2-й области. На рис. 1 показаны радиальные профили продольной $u(r; z = 0)$ и тангенциальной $w(r; z = 0)$ компонент скорости на срезе разрядного канала ($z = 0$), рассчитанные по программе Alpha для давления 80 мбар и трех значений мощности N_{ap} . Здесь z и r — продольная и радиальная координаты в цилиндрической системе координат, z отсчитывается от среза разрядного канала плазмотрона. Следует отметить, что профили тангенциальной компоненты скорости при $N_{ap} = 30, 50$ и 70 кВт различаются несильно, причем максимумы локализованы близко к расстоянию 20 мм от оси.

Для расчета дозвукового обтекания модели с учетом закрутки потока разработана модификация программы Beta — программа WBeta, включающая расчет тангенциальной компоненты скорости $w(z, r)$ во 2-й области. В качестве граничного условия для расчета $w(z, r)$ используется полученный ранее радиальный профиль $w_c(r)$ на выходе из разрядного канала. Программа WBeta реализует численное решение полных уравнений Навье—Стокса, при этом используется в основном тот же численный метод, что и в программе Beta, основанный на алгоритме SIMPLE Патанкара—Сполдинга [11]. Используется разностная сетка, сильно неравномерная в продольном и радиальном направлениях, позволяющая обеспечить достаточно много точек внутри относительно тонкого пограничного слоя вблизи лобовой поверхности модели. Важными результатами расчета по программе WBeta являются условная граница пограничного слоя на оси симметрии $z = Z_c, r = 0$ и набор безразмерных параметров на внешней границе пограничного слоя. Эти параметры будут использоваться при дальнейшем расчете течения в пограничном слое конечной толщины в окрестности точки торможения по программе Gamma.

Безразмерные параметры на внешней границе пограничного слоя, которые используются при расчете пограничного слоя, определяются следующими формулами:

$$\Delta = \delta/R_m \quad (1.1)$$

$$V_{e0} = u(Z_e, r = 0)/U_0 \quad (1.2)$$

$$\beta_e = u_1(Z_e) \quad (1.3)$$

$$\Omega = R_m du_1(z)/dz \quad (1.4)$$

$$u_1(z) = (R_m/U_0) \partial v(z, r)/\partial r \quad (1.5)$$

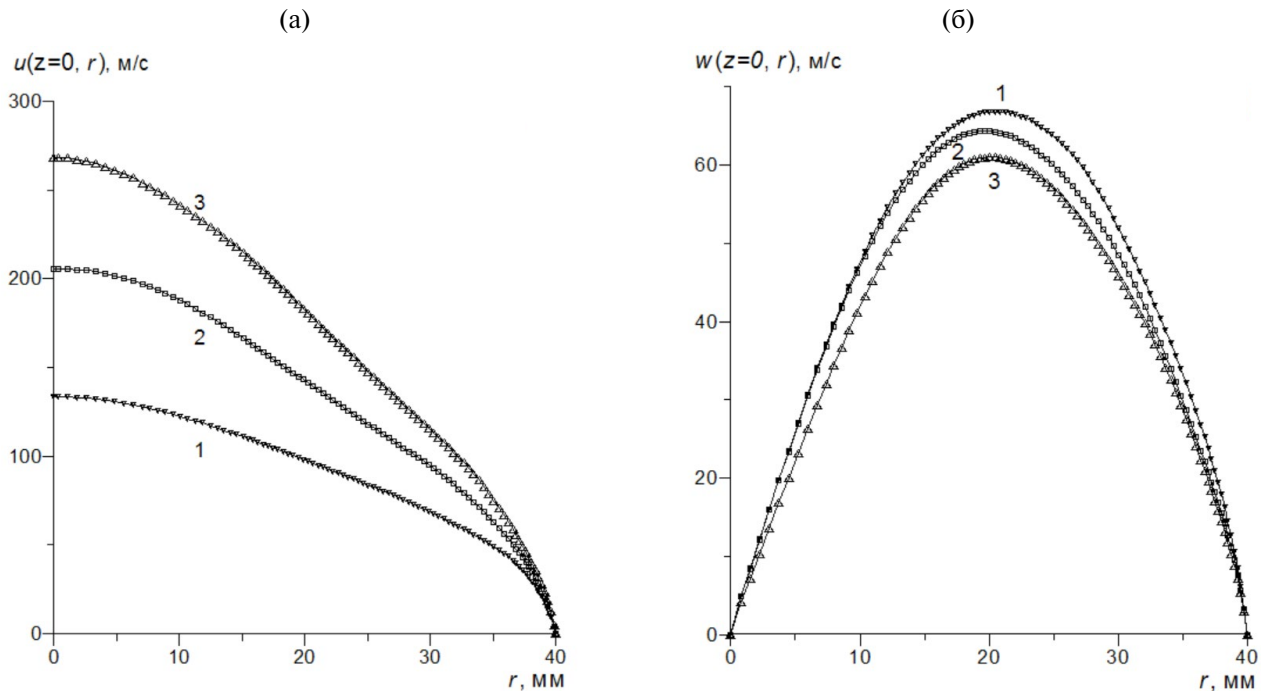


Рис. 1. Радиальные профили продольной (а) и тангенциальной (б) компонент скорости на срезе разрядного канала для трех значений мощности N_{ap} : 1 – 3 – $N_{\text{ap}} = 30, 50$ и 70 кВт.

Здесь δ — размерная толщина пограничного слоя; Z_e — продольная координата, соответствующая положению внешней границы пограничного слоя; индекс “e” обозначает значение на оси симметрии на внешней границе пограничного слоя; $U_0 = u(0, 0)$ — скорость потока на срезе канала на оси симметрии; $R_m = 25$ мм — радиус модели; $u_1(z)$ — безразмерный градиент скорости вдоль оси струи, при этом производная $\partial v(z, r)/\partial r$ в формуле (1.5) берется в окрестности оси симметрии $r = 0$; β_e — безразмерный градиент скорости на внешней границе пограничного слоя; Ω — параметр, характеризующий завихренность потока на внешней границе пограничного слоя.

Далее представлены результаты расчетов по программе WBeta и их сравнение с расчетами без учета закрутки. На рис. 2 показаны изолинии безразмерной функции тока $f(z, r)$, отнесенной к своему значению на стенке канала, в ядре струи для случая обтекания модели, расположенной на расстоянии $Z_m = 60$ мм от среза разрядного канала плазмотрона, для режима малой мощности $N_{\text{ap}} = 20$ кВт. Здесь и далее все расчеты проведены для давления $P = 80$ мбар. Верхняя часть рис. 2а — расчет с учетом закрутки, перед моделью при $z > 50$ мм образуется вихревая зона с отрицательными значениями функции тока и продольной компоненты скорости. Нижняя часть рис. 2б — расчет без учета закрутки, перед моделью нет вихревой зоны, а имеется относительно тонкий пограничный слой, функция тока и продольная компонента скорости положительные или равны нулю. На рис. 3 показаны изотермы T [K] при обтекании модели для того же режима, что и на рис. 2, с аналогичными обозначениями; а и б — результаты расчетов с учетом и без учета закрутки.

Появляющаяся при расчете обтекания модели с учетом закрутки при малой мощности плазмотрона $N_{\text{ap}} \leq 20$ кВт вихревая область перед передней критической точкой модели делает невозможной применение методики [1], разработанной в ИПМех РАН для расчета теплопередачи к модели по программе Gamma. Поэтому далее в работе рассматриваются режимы с мощностью $N_{\text{ap}} \geq 30$ кВт, для которых перед моделью имеется относительно тонкий пограничный слой и нет вихревой области.

Сравнение расчетов обтекания модели, проведенных с учетом и без учета закрутки для различных мощностей $N_{\text{ap}} \geq 30$ кВт показало, что влияние закрутки на изолинии f и изотермы мало в области ядра струи вблизи модели, но характер течения вдали от модели вблизи стенки испытательной камеры плазмотрона существенно меняется при учете закрутки.

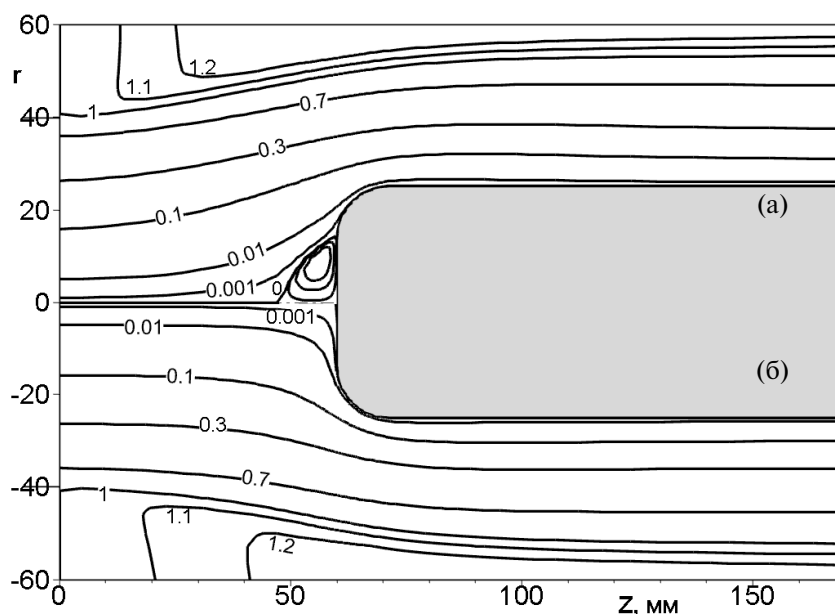


Рис. 2. Изолинии безразмерной функции тока в ядре струи для режима $N_{ap} = 20$ кВт, $Z_m = 60$ мм: (а) — расчет с учетом закрутки; (б) — расчет без учета закрутки.

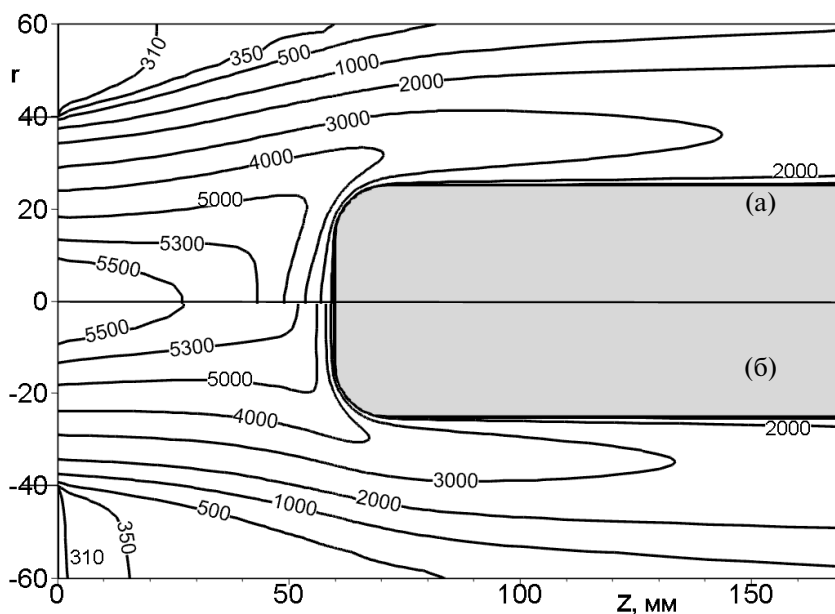


Рис. 3. Изотермы в ядре струи для режима $N_{ap} = 20$ кВт, $Z_m = 60$ мм: (а) — расчет с учетом закрутки; (б) — расчет без учета закрутки.

На рис. 4 и 5 показаны изолинии тангенциальной компоненты скорости $w(z, r)$ [м/с] и изолинии безразмерной функции тока $f(z, r)$ при обтекании модели во всей области испытательной камеры плазмотрона для режима $N_{ap} = 30$ кВт, $Z_m = 60$ мм. На верхней части рис. 5 а показаны результаты расчета с учетом закрутки потока, на нижней части б — без учета закрутки. Как видно из сравнения (а) и (б), учет закрутки приводит к исчезновению вихревой зоны вблизи стенки испытательной камеры, $z \sim 0 - 600$ мм, $r \sim 250 - 400$ мм.

На рис. 6 показано распределение энтальпии $h(z, 0)$ [МДж/кг] и температуры $T(z, 0)$ [К] вдоль оси симметрии от среза разрядного канала до переднего торца модели для трех режимов $N_{ap} = 30, 50, 70$ кВт, $Z_m = 60$ мм. Сплошными кривыми показаны расчеты с учетом закрутки, штриховые кри-

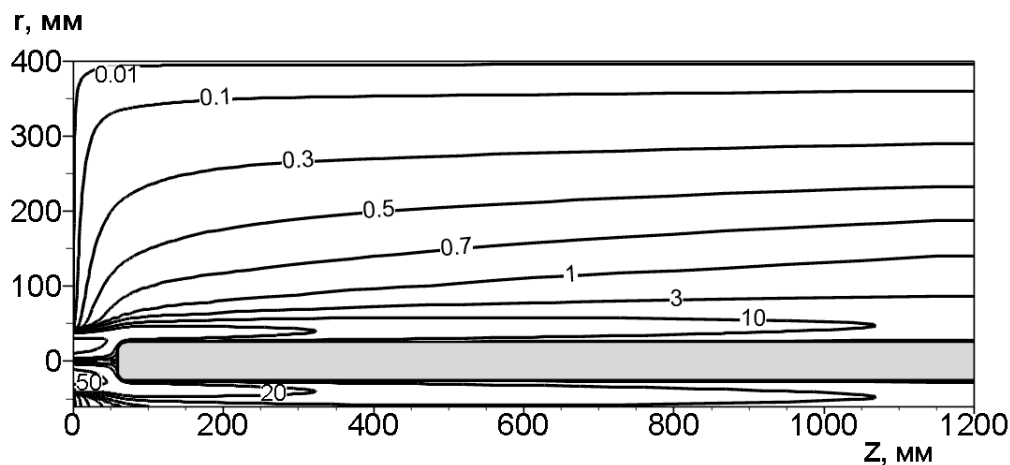


Рис. 4. Изолинии тангенциальной компоненты скорости $w(z, r)$ [м/с] во всей расчетной области для режима $N_{ар} = 30$ кВт, $Z_m = 60$ мм.

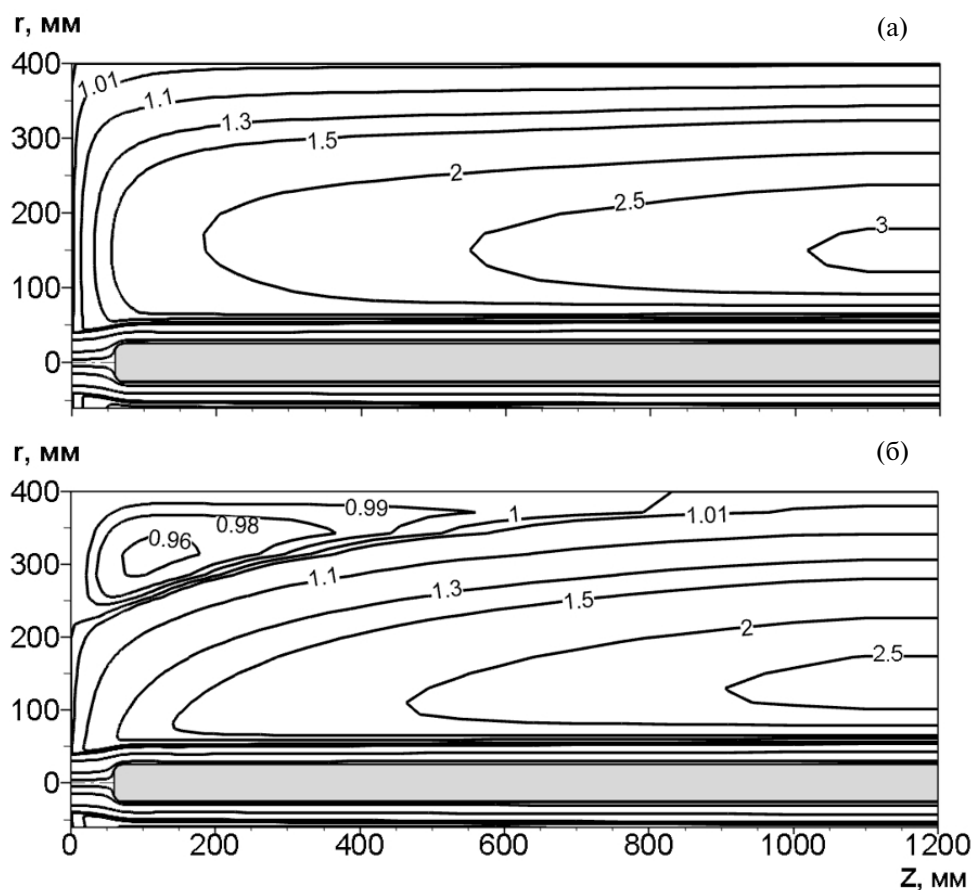


Рис. 5. Изолинии безразмерной функции тока во всей расчетной области для режима $N_{ар} = 30$ кВт, $Z_m = 60$ мм: (а) — расчет с учетом закрутки; (б) — расчет без учета закрутки.

вые — расчеты без учета закрутки. Учет закрутки практически не влияет на распределение энтальпии и температуры вне области пограничного слоя, а в области начала пограничного слоя при мощности $N_{ар} = 30$ кВт энтальпия и температура, полученные без учета закрутки, являются немного завышенными. При $N_{ар} \geq 50$ кВт учет закрутки практически не влияет на энтальпию и температуру в том числе и в области пограничного слоя. На рис. 6а символами “+” обозначено положение условной внешней

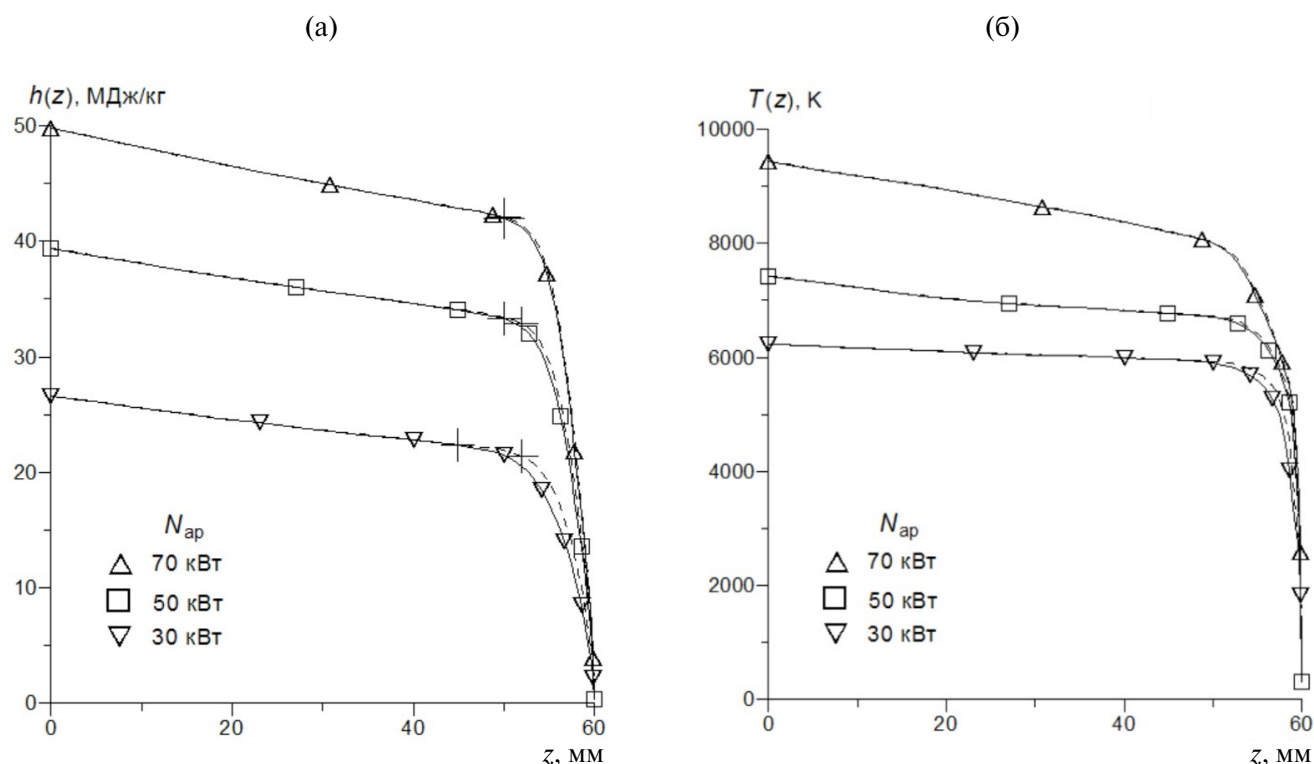


Рис. 6. Распределения энтальпии $h(z)$ (а) и температуры $T(z)$ (б) вдоль оси струи от среза канала до модели для трех значений мощности $N_{\text{ap}} = 30, 50, 70$ кВт; штриховые кривые — расчеты без учета закрутки.

границы пограничного слоя Z_e для соответствующих расчетов. Толщина пограничного слоя $\delta = Z_m - Z_e$, $Z_m = 60$ мм, полученная в расчетах без учета закрутки, оказывается заниженной для $N_{\text{ap}} = 30$ и 50 кВт, а для $N_{\text{ap}} = 70$ кВт положение внешней границы пограничного слоя совпадает в расчетах с учетом и без учета закрутки.

На рис. 7а,б показаны распределения безразмерных параметров $u(z, 0)/U_0$ и $u_1(z)$ для режимов $N_{\text{ap}} = 30$ и 70 кВт; здесь U_0 — скорость потока на срезе разрядного канала на оси симметрии, $u_1(z)$ определяется формулой (1.5). Сплошными и штриховыми кривыми показаны расчеты с учетом и без учета закрутки. Символами “+” на кривых обозначена условная внешняя граница пограничного слоя. Как видно из рис. 6, 7, закрутка потока слабо влияет на распределение энтальпии и температуры вдоль оси симметрии, в то же время влияние закрутки на безразмерную продольную компоненту скорости $u(z, 0)/U_0$ и на градиент радиальной компоненты скорости $u_1(z)$ существенно больше. Учет закрутки также существенно влияет на положение внешней границы пограничного слоя Z_e , которое определяется из условия максимума производной $du_1(z)/dz$, т.е. функция $u_1(z)$ вблизи Z_e должна быть близка к линейной. Для режима $N_{\text{ap}} = 30$ кВт расчет без учета закрутки дает значение Z_e , завышенное на 16%, что соответствует занижению толщины пограничного слоя δ на 46%. С увеличением мощности уменьшается влияние закрутки потока на толщину пограничного слоя δ и на параметры потока $h(z)$, $T(z)$, $u(z)$, $u_1(z)$ на оси симметрии ($r = 0$).

В табл. 1 приведены наборы безразмерных параметров (1.1)-(1.4) для шести режимов обтекания модели с закругленной кромкой, для трех значений мощности N_{ap} и двух значений Z_m , рассчитанных с учетом w — закрутки потока (первые строки) и без учета w (вторые строки). В целом, закрутка существенно влияет на безразмерные параметры при малой мощности $N_{\text{ap}} = 30$ кВт, но с увеличением мощности N_{ap} это влияние уменьшается. Например, влияние закрутки на параметр β_e составляет порядка 50% при $N_{\text{ap}} = 30$ кВт и уменьшается до 2% при увеличении мощности до 70 кВт. Имея в виду, что тепловой поток к холодной идеально каталитической стенке q_{wc} пропорционален $(\beta_e)^{1/2}$, получаем оценки 25% и 1% влияния закрутки на q_{wc} для малой и большой мощности N_{ap} .

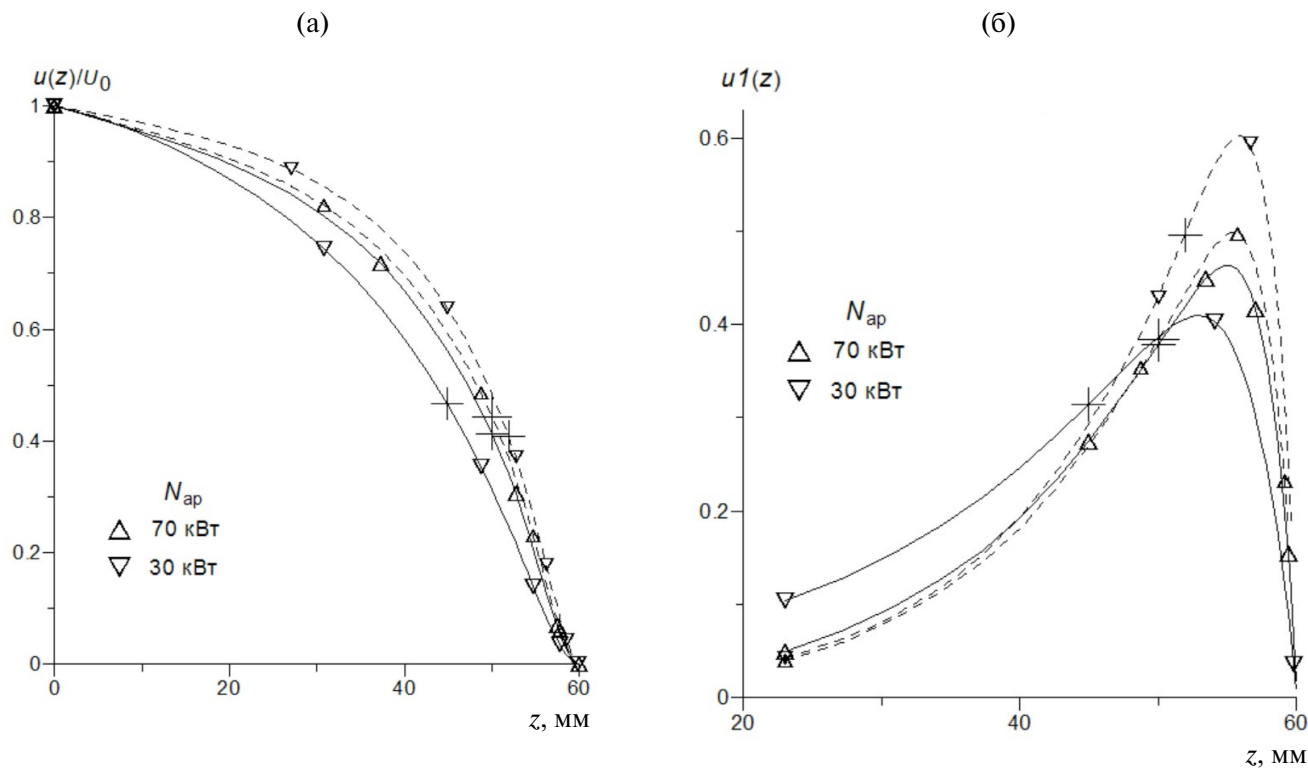


Рис. 7. Распределения безразмерных параметров — скорости $u(z)/u(0)$ (а) и градиента скорости $u_1(z)$ (б) вдоль оси струи для двух значений мощности $N_{ap} = 30$ и 70 кВт; штриховые кривые — расчеты без учета закрутки.

Таблица 1.

N_{ap} , кВт	Z_m , мм	Δ	β_c	V_{c0}	Ω	
30	60	0.604	0.315	0.466	0.365	с учетом w
		0.324	0.496	0.408	0.915	без учета w
50	60	0.400	0.407	0.413	0.621	с учетом w
		0.324	0.481	0.400	0.844	без учета w
70	60	0.400	0.378	0.413	0.564	с учетом w
		0.400	0.384	0.444	0.654	без учета w
30	80	0.604	0.284	0.405	0.307	с учетом w
		0.324	0.476	0.390	0.868	без учета w
50	80	0.400	0.385	0.389	0.592	с учетом w
		0.324	0.464	0.386	0.869	без учета w
70	80	0.400	0.366	0.394	0.613	с учетом w
		0.400	0.374	0.428	0.708	без учета w

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены численные исследования обтекания цилиндрической модели дозвуковой струей диссоциированного воздуха, истекающей из разрядного канала ВЧ-плазматрона ВГУ-4 ИПМех РАН по модифицированной программе WBeta с учетом закрутки потока. Расчеты проведены для условий экспериментов, для варианта геометрии модели с закругленной передней кромкой, при давлении 80 мбар, в диапазоне мощности плазматрона $N_{ap} = 30 - 70$ кВт и расстояния от среза разрядного канала до модели $Z_m = 60 - 90$ мм. Установлено, что параметр N_{ap} слабо влияет на радиальный профиль тангенциальной компоненты скорости w_c на срезе разрядного канала. Максимум w_c локализован на расстоянии, равном половине радиуса разрядного канала.

Сравнение расчетов с учетом и без учета закрутки потока в испытательной камере показало, что учет закрутки при малой мощности $N_{ap} \leq 20$ кВт приводит к появлению вихревой зоны перед моделью вблизи оси симметрии вместо относительно тонкого пограничного слоя. При увеличении мощности $N_{ap} \geq 30$ кВт вихревой зоны перед моделью больше нет, а имеется классический вариант относительно тонкого пограничного слоя перед моделью. При этом учет закрутки мало влияет на изолинии функции тока и изотермы в ядре струи перед моделью, но приводит к существенному изменению толщины пограничного слоя и безразмерного параметра Ω , характеризующего закрутку потока на внешней границе пограничного слоя.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по теме Госзадания № 124012500440-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное исследование течений и теплообмена в индукционной плазме высокочастотного плазматрона. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Том VII-1. Математическое моделирование в низкотемпературной плазме. Часть 2/ Под ред. Ю.П. Попова. М.: ЯНУС-К, 2008, С. 220–234.
2. Васильевский С.А., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Чаплыгин А.В. Тепловой эффект поверхностного катализа в дозвуковых струях диссоциированного воздуха: эксперимент на ВЧ-плазматроне и численное моделирование // Изв. РАН. МЖГ. 2020. № 5. С. 137–150.
3. Васильевский С.А., Колесников А.Ф., Якушин М.И. Определение эффективных вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов в условиях влияния на тепловой поток газофазных реакций // ТВТ. 1991. Т. 29. № 3. С. 521
4. Власов В.И., Залогин Г.Н., Землянский Б.А., Кнотько В.Б. Методика и результаты экспериментального определения каталитической активности материалов при высоких температурах // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 5. С. 178.
5. Chazot O., Krassilchikoff H.V., Thomel J. TPS ground testing in plasma wind tunnel for catalytic properties determination // 46th AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2008-1252, Jan. 2008.
6. Nguyen-Kuok S. Theory of low-temperature plasma physics. Springer International Publishing Switzerland, 2017. 495 с. DOI: 10.1007/978-3-319-43721-7
7. Сахаров В.И. Численное моделирование термически и химически неравновесных течений и теплообмена в недорасширенных струях индукционного плазматрона // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 6. С. 157–168.
8. Yu M., Takahashi Y., Kihara H., Abe K., Yamada K., Abe T. Numerical investigation of flow fields in inductively coupled plasma wind tunnels // Plasma Sci. Technol. 2014. V. 16. P. 930–940.
9. Власов В.И., Залогин Г.Н., Ковалев Р.В. Численное моделирование течения различных плазмообразующих газов в тракте ВЧ плазматрона // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19. №4. С. 2–23. DOI: 10.33257/PhChGD.19.4.775
10. Chazot O., Panerai F., Muylaert J. M., Thoemel J. Catalysis phenomena determination in plasmatron facility for flight experiment design // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA Paper. 2010. P. 1248.
11. Patankar S.V., Spalding D.B. Heat and mass transfer in boundary layers. London: Intertext Books. 1970.

EFFECT OF FLOW SWIRLING ON THE SUBSONIC AIR JET IN THE VGU-4 HF PLASMATRON

S. A. Vasil'evskii and A. F. Kolesnikov*

^a Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: koles@ipmnet.ru*

The effect of taking into account stream swirl when calculating the flow of a subsonic air plasma jet past a cylindrical model of 50 mm in diameter when the jet flows out from the discharge channel into the test chamber of the VGU-4 IPMech RAS HF plasmatron is studied. A comparison has been made of calculations of axisymmetric flow past the model based on the full Navier-Stokes equations taking into account (new results) and without taking into account (old results) the tangential velocity component w under the experimental conditions at a pressure of 80 mbar in a wide range of anode supply power at various distances from the plasmatron channel outlet to the model. It is shown that when calculating the VGU-4 plasmatron for a low power with taking into account flow swirl, the pattern of flow past the frontal part of the model is modified, namely, a vortex region is formed in front of the model instead of a relatively thin boundary layer. For moderate and high plasmatron power, the effect of taking into account swirl on the isolines of the dimensionless stream function and on the isotherms is small in the jet core region in front of the model, but is significant in the outer flow region in the test chamber.

Keywords: HF plasmatron, numerical modeling, subsonic jet, flow swirl, dissociated air.