

УДК: 621.3.015.533

ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПРИСТЕНОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ

© 2012 А. В. Ивченко, О. А. Журавлев, В. Г. Шахов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В работе представлены результаты исследования газовых потоков, формируемых поверхностными разрядами в воздухе атмосферного давления, применительно к задачам управления течением рабочих сред. Показана возможность разрушения вихревых структур приповерхностными струями. Обсуждаются конфигурации электродных систем для модификации пограничного слоя.

Пограничный слой, система электродов, поверхностный разряд, пристеночное течение, визуализация, PIV-измерения

Известно [1], что движение газа у поверхности твёрдых тел играет существенную роль в процессах обтекания и оказывает большое влияние на аэродинамические характеристики летательных аппаратов (ЛА) и других транспортных систем, а также газодинамическую устойчивость компрессора газотурбинных двигателей (ГТД). Из-за трения газа о стенку в приповерхностных слоях среды наблюдается торможение частиц и происходит образование пограничного слоя [2]. При внешних возмущениях потока в пограничном слое развиваются неустойчивости, связанные с распространением слабо затухающих пульсаций, которые индуцируют образование турбулентных структур и зон отрыва [3, 4]. Развитие отрывных явлений на обтекаемых поверхностях ЛА и ГТД приводит к значительному росту энергетических потерь, снижению интенсивности отвода тепла, генерации аэродинамического шума и вибраций [5, 6]. В этой связи управление аэродинамическими характеристиками приповерхностных слоёв газа представляет собой актуальную задачу технической аэродинамики и определяет необходимость поиска новых методов и средств воздействия на пограничные слои.

Управление течением сред в пристеночных слоях традиционно осуществляется путём применения пассивных и активных методов воздействия [1]. При пассивном управлении передача дополнительной энергии в пограничный

слой осуществляется за счёт перераспределения кинетической энергии внешнего потока газа. Область применения данных методов является ограниченной и, как правило, реализуется в условиях ускоренных течений. Более широкие возможности имеет активное воздействие, когда в пристеночной области потока производится отсос или вдув дополнительных масс газа, осуществляется нагрев или захлаживание пограничного слоя. Другой способ активного управления потоком состоит в использовании неравновесных сред, образующихся в зоне горения разряда и создающих дополнительные каналы передачи энергии движущемуся газу [7, 8]. За счёт действия электрофизических и тепловых факторов плазма разряда позволяет существенно изменить макроскопические параметры газовой среды, создать управляемые электрическим полем течения [9, 10]. Однако значительные затраты энергии на создание больших объёмов плазмы препятствуют внедрению данной технологии в авиации. Снижению энергетических затрат может способствовать непосредственное воздействие на пограничный слой путём возбуждения поверхностных разрядов [11].

Согласно [12] поверхностный разряд возникает в условиях неоднородного электрического поля и распространяется вдоль границы раздела двух диэлектрических сред. В процессе развития разряда можно выделить две стадии, которые следуют друг за другом по мере возрастания приложенного напряжения.

Изначально разряд формируется в виде слаботочной фазы, связанной с процессами зарядки или разрядки участков поверхности диэлектрической подложки у разрядных электродов. Дальнейшее нарастание напряжения приводит к переходу поверхностного разряда в завершённую фазу, при которой сильноточные искровые каналы перекрывают плоский межэлектродный промежуток.

При получении завершённой или незавершённой стадии поверхностного разряда возможны различные механизмы

его взаимодействия с набегающим потоком. При больших токах разряда в плазме начинает преобладать теплофизические процессы, приводящие к перегреву газа, изменению скорости звука, образованию ударных волн [13]. Возникающие газодинамические возмущения у поверхности тела способны существенно повлиять на дозвуковые и сверхзвуковые течения газа. Это может быть использовано для управления траекторией полёта ЛА [13, 14].

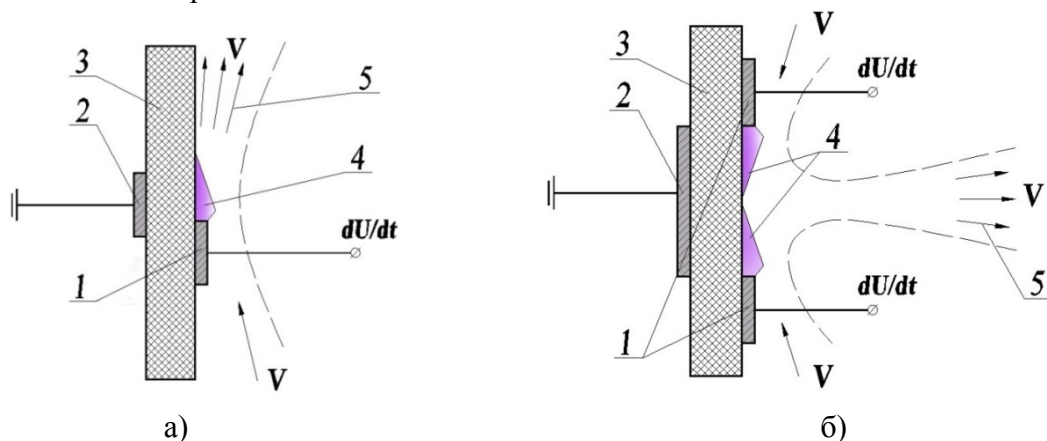


Рис. 1. Варианты схем электродных систем поверхностного разряда с неподвижным диэлектрическим барьером для образования пристеночных течений V : а)- ассиметричная конфигурация электродов; б)- система генерации встречных разрядов. 1-разрядный электрод; 2-заземленный экран; 3-диэлектрический барьер; 4- полоса разряда; 5-поток газа

На рис. 1, 2 представлены схемы формирования поверхностных разрядов, используемых для генерации пристеночных потоков.

Для получения плазмы на поверхности неподвижного диэлектрического слоя (рис. 1) требуется использовать знакопеременное напряжение (dU/dt), что обеспечивает нейтрализацию осаждаемых зарядов. В квазинепрерывном режиме частотный поверхностный разряд (ЧПР) формируется в виде суперпозиции стримерных каналов, распространяющихся по поверхности подложки. Ширина свечения плазмы 4 у электрода 1 (рис. 1) зависит от величины амплитуды прикладываемого напряжения, а также характеристик диэлектрического барьера 3, и может достигать 100 мм [12, 15].

Использование завершеного поверхностного разряда приводит к повышенной абляционной и эрозионной нагрузке на диэлектрик, сопровождается разрушением диэлектрической подложки и снижением долговечности электродной системы [15]. Поэтому более перспективным представляется подход, связанный с применением незавершённых поверхностных разрядов, т.к. это позволяет увеличить ресурс используемых электродов до 103-104 часов.

Генерация незавершенных поверхностных разрядов протекает при конкуренции теплофизических и электрофизических процессов над поверхностью диэлектрика. Рассеиваемая в плазме энергия электрического поля приводит к формированию

электро-термо-газодинамических потоков [8,16], в которые вовлекается среда из пристеночной области. Присутствие в плазменном слое возбуждённых частиц способствует изменению вязкостных свойств газа [7, 17], а концентрация зарядовой компоненты с $n_e \leq 10^{12}-10^{14} \text{ см}^{-3}$ оказывается недостаточной для развития МГД-неустойчивостей потока, характерных для сильноионизованных сред [18]. Ускорение ионов в плазме разряда приводит к передаче их импульса нейтральным частицам газа, обеспечивая наполнение профиля скорости в пограничном слое или самогенерацию струйных течений [16].

На практике формирование незавершённых поверхностных разрядов возможно на поверхности неподвижных и движущихся диэлектрических барьеров [15].

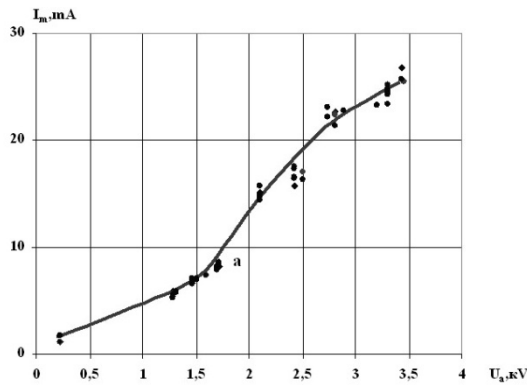


Рис.3. Характерная вольтамперная характеристика ЧПР в стационарной системе электродов при $dU/dt \cong 10^9 \text{ В/с}$ и толщине полиимидной пленки $d=320 \text{ мкм}$.

При возбуждении однородного поверхностного разряда (ОПР) на движущихся диэлектриках (рис. 2) на образование плазмы влияет процесс пространственного перемещения изолирующего слоя 4. Согласно [15] механический вынос осаждённых зарядов из межэлектродного промежутка повышает однородность плазменных структур и создаёт условия для генерации ОПР при постоянном напряжении [19].

Использование роторной системы [20] обеспечивает получение диффузных плазменных слоёв в газах при атмосферном и субатмосферном давлении. Согласно рис. 2 высоковольтный электрод (ВВЭ) 2 производит зарядку движущегося диэлектрического слоя 4. Нейтрализация

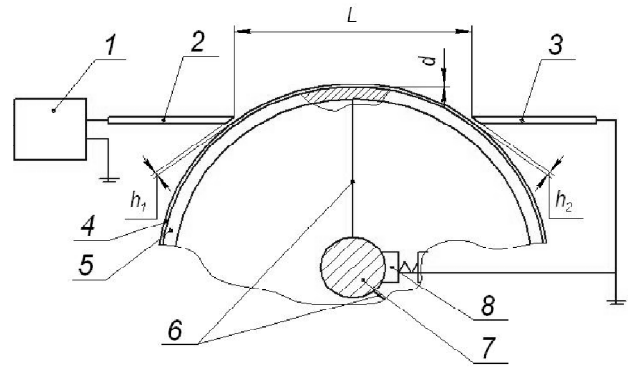


Рис. 2. Схема установки для возбуждения однородного поверхностного разряда в промежутке $L=25 \text{ мм}$ при толщине диэлектрического слоя $d \approx 1 \text{ мм}$: 1- высоковольтный источник постоянного тока; 2, 3-ножевые электроды; 4- диэлектрический барьер; 5, 6, 7-подвижный электрод; 8-скользящий контакт

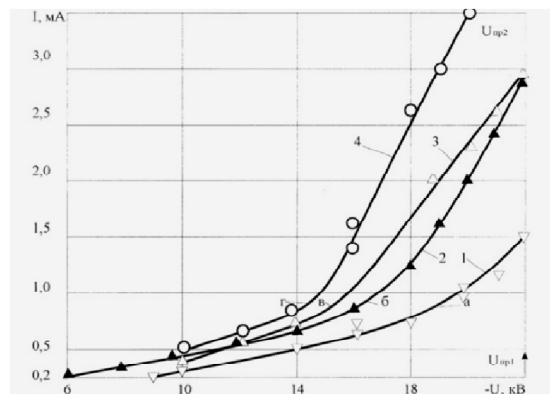


Рис.4. Вольтамперная характеристика ОПР при различных толщине d диэлектрического слоя и высоте h рабочих зазоров: 1 – $d=700 \text{ мкм}$, $h_1 \approx h_2 = 0,5 \text{ мм}$, лезвийные электроды; 2–4 – $d = 875 \text{ мкм}$; 2 – лезвийные электроды; 3 – фольговый подпружиненный ВВЭ; 4 – фольговые подпружиненные ВВЭ и ТЭ

зарядов осуществляется токоёмным электродом (ТЭ) 3. По мере увеличения напряжения поверхностный разряд распространяется в виде полосы однородного свечения от ТЭ к ВВЭ, постепенно перекрывая весь межэлектродный промежуток L .

Особенности электрофизических процессов в межэлектродных промежутках с неподвижным и движущимся диэлектрическим слоем раскрываются посредством вольтамперных характеристик (ВАХ) [19, 21]. Представленные на рис. 3, 4 ВАХ имеют вид, свойственный барьерному разряду [22]. Это выражается наличием на кривых характерного излома (точки а, б, в), а также зависимостью ВАХ от свойств используемого диэлектрика.

До зажигания разряда в стационарной системе электродов средний ток I_m как функция амплитуды напряжения U_a изменяется практически линейно, что обусловлено ёмкостью диэлектрического барьера ($I \cong CdU/dt$). Перелом в росте I_m (точка а, рис. 3) происходит при появлении свечения плазмы и связан с процессом заполнения рабочей кромки электрода 1 (рис. 1) стримерными каналами.

При генерации газоразрядных процессов в роторной системе (рис. 2) точки а, б, в ВАХ (рис. 4) соответствуют моменту перекрытия межэлектродного промежутка однородным свечением плазмы. Эти точки отвечают условиям интенсификации ионизационных процессов в порожке ВВЭ-ТЭ и переходу разряда в завершённую фазу развития. Отличительной чертой приведённых на рис. 4 ВАХ является зависимость тока разряда от линейной скорости перемещения диэлектрика. Повышение скорости движения подложки приводит к смещению ВАХ (рис. 4) влево, что свидетельствует о значительном вкладе механического процесса переноса зарядов в суммарный газоразрядный ток [19].

Возможности использования данных разрядов для получения пристеночных потоков демонстрируются схемами на рис. 1, 2. Согласно рис. 1а, асимметричная конфигурация электродов ЧПР позволяет создать условия для тангенциального ускорения газа V у поверхности подложки [16], а применение встречных разрядов аналогичного типа (рис. 1б) обеспечивает механизм формирования микроструй V нормально ориентированных к поверхности диэлектрика. Такие струи способны покидать пределы пограничного слоя и оказывать воздействие на внешнее течение [23]. Менее изученной является схема на рис. 2 [19], где вращение ротора механически увлекает за собой пристеночные слои газа. Здесь поверхностный разряд может осуществлять перераспределение импульса в приповерхностном слое газа, а также усиливать течение вдоль поверхности движущегося диэлектрика. Однако применение поверхностных разрядов для решения практических задач требует знания

количественных и качественных характеристик возбуждаемых потоков, а также определения связи их характеристик с энергетическими параметрами разряда, конструктивными особенностями электродной системы.

Поэтому важной целью исследования является изучение структуры электро-термо- и газодинамических течений, формируемых под действием поверхностных разрядов, возбуждаемых на неподвижных и движущихся диэлектрических подложках. Для решения данной задачи регистрация потоков производилась при помощи современных оптических методов, включающих динамическую теневую регистрацию распределений плотности, визуализацию линий тока методом лазерного «ножа», а также определение полей скоростей течения газа методом PIV [24].

На рис. 5, 6 приведены результаты исследования течений, формируемых ЧПР у поверхности многоэлектродной системы асимметричного типа. Поток возбуждался разрядом при амплитуде знакопеременного напряжения $|U| < 6$ кВ и частоте 8 кГц в неподвижной атмосфере ($V_\infty = 0$). Плотность мощности энергоклада была невелика и составляла не более $W/S < 1$ Вт/см².

Теневые картины на рис. 5 демонстрируют струйные течения [25], сформированные при различном уровне высокого напряжения U на разрядных электродах. Отсюда видно, что по мере роста амплитуды U происходит изменение направленного движения потока газообразной среды. В случае рис. 5 а и 5 б действие ионного ветра, термодиффузии и архимедовой силы организует над поверхностью диэлектрика конвективные течения восходящего газа. Дальнейшее увеличение U обеспечивает перестройку потока, что сопровождается образованием тангенциальных струй (рис. 5в). Именно этому состоянию соответствует поле скоростей, полученное методом PIV (рис. 6). Здесь по мере движения газа от одного разрядного электрода к другому в зоне разряда происходит постепенное ускорение частиц и достигается скорость потока 0,4 м/с. За счёт сил трения пристеночный поток

увлекает за собой внешние слои газа, распространяясь на 2-3 мм от подложки. У рабочей кромки каждого разрядного электрода (рис. 6) наблюдается подсос внешних масс газа. Данный эффект при внешнем обтекании ЧПР может привести к сокращению толщины слоя вытеснения. Это подтверждается данными визуализаций [26].

Потенциальные возможности действия тангенциальных струй (рис. 5, 6) на внешнее течение демонстрирует рис. 7, полученный путём применения метода лазерного «ножа». Здесь пристеночная струя, формируемая поверхностным разрядом, участвует в процессе поглощения вихревой структуры, перемещающейся над поверхностью электродной системы. В момент времени $t=0$ (рис. 7а), ядро вихря находится на расстоянии более 20 мм и

постепенно приближается к поверхности электродной системы, а уже через 0,375с (рис. 7г) происходит его соприкосновение с зоной горения разряда. Процесс разрушения сопровождается постепенной деформацией и исчезновением вихря в области у рабочей кромки разрядного электрода.

Направленное движение вихревых структур к поверхности плазменного слоя с расстояний, превышающих толщину пограничного слоя, можно объяснить механизмом подсоса газа у рабочей кромки разрядного электрода (рис. 6). Полученные результаты подтверждаются данными работы [27], где для крыла дельтаплана также была установлена возможность газоразрядного разрушения вихревых образований.

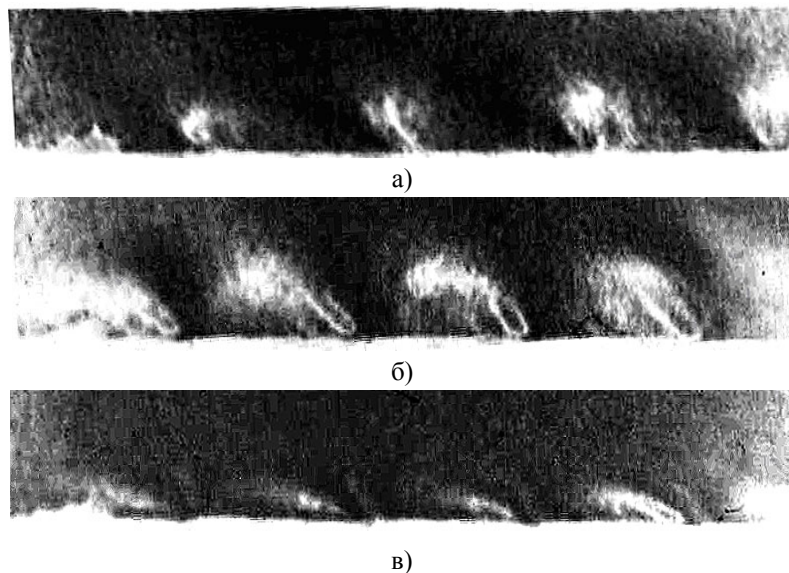


Рис. 5. Шлиренграммы потоков, возбуждаемых в ряде полосовых электродов ЧПР при разном уровне рабочего напряжения U : $U_a < U_b < U_v$

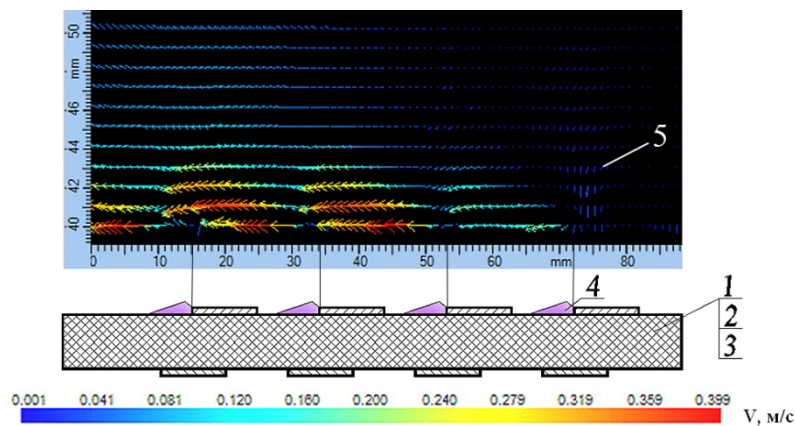


Рис. 6. Поле скоростей в пристеночной области многоэлектродной системы ЧПР при $U=U_v$ (см. рис. 5): 1-3 – элементы системы электродов; 4- полосы свечения разряда; 5- зона подсоса газа

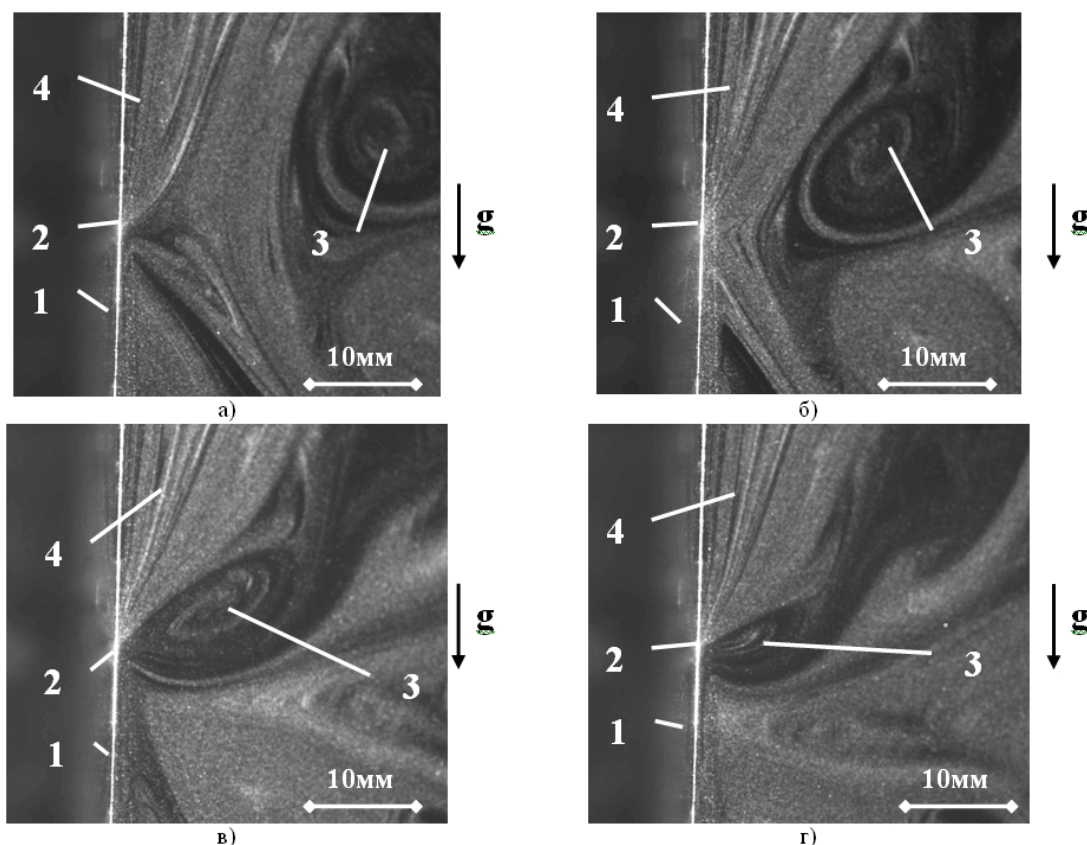


Рис. 7. Процесс поглощения вихря областью пристеночной струи, возбуждаемой ЧПР в разные моменты времени: а) $t=0$; б) $t=0,125$ с; в) $t=0,25$ с; г) $t=0,375$ с; 1-электродная система; 2-положение разряда; 3-разрушаемый вихрь; 4-область пристеночной струи, г-ускорение свободного падения

Для течений, возбуждаемых действием встречных поверхностных разрядов, структура потока в пристеночной области представлена на рис. 8, 9. Режим генерации плазмы существенно не отличался от предшествующего случая, однако из-за иной конфигурации электродной системы поверхностный разряд приводил к новым результатам.

Согласно дымовой визуализации на рис. 8 истечение струи 3 происходит непосредственно из темновой области 2, расположенной между встречными плазменными “листами”. Отходящие массы газа замещаются приточным течением 4, которое визуализируется в виде дымовых слоистых дуг.

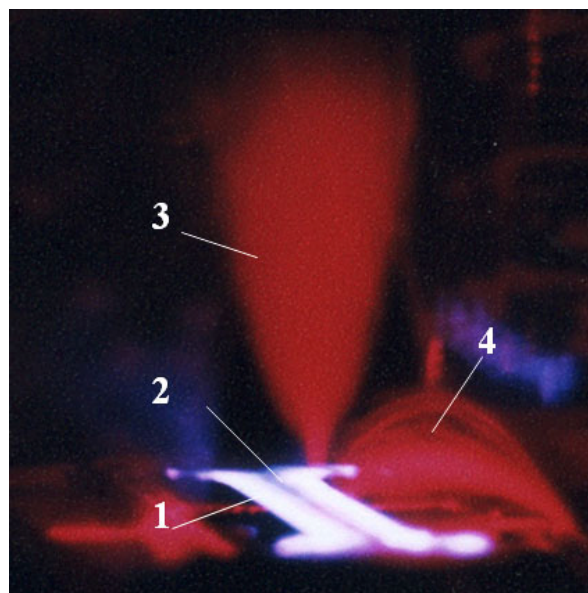


Рис. 8. Дымовая визуализация струи ориентированной по нормали к поверхности диэлектрика: 1-свечение плазмы встречных частотных разрядов; 2-темновая зона межэлектродного промежутка; 3-струя, направленная по нормали к поверхности; 4-приточное течение в зону горения разряда

Из данных PIV-регистрации (рис. 9) следует, что на процесс формирования отходящих по нормали струй влияют как встречные 4, так и периферийные 5 поверхностные разряды. На периферии электродной системы (рис. 9а) поверхностный разряд развивает пристеночные потоки 9, направленные в противоположные стороны. Взаимодействие тангенциальных и нормальных струй 7, 9 приводит к

образованию развитых парных вихревых структур, расположенных непосредственно над разрядными электродами. Изоляция периферийной части кромок электродной системы (рис. 9б) обеспечивала прирост скорости струйного потока на 40-50% и увеличивала в 1,5-2 раза дальность струи.

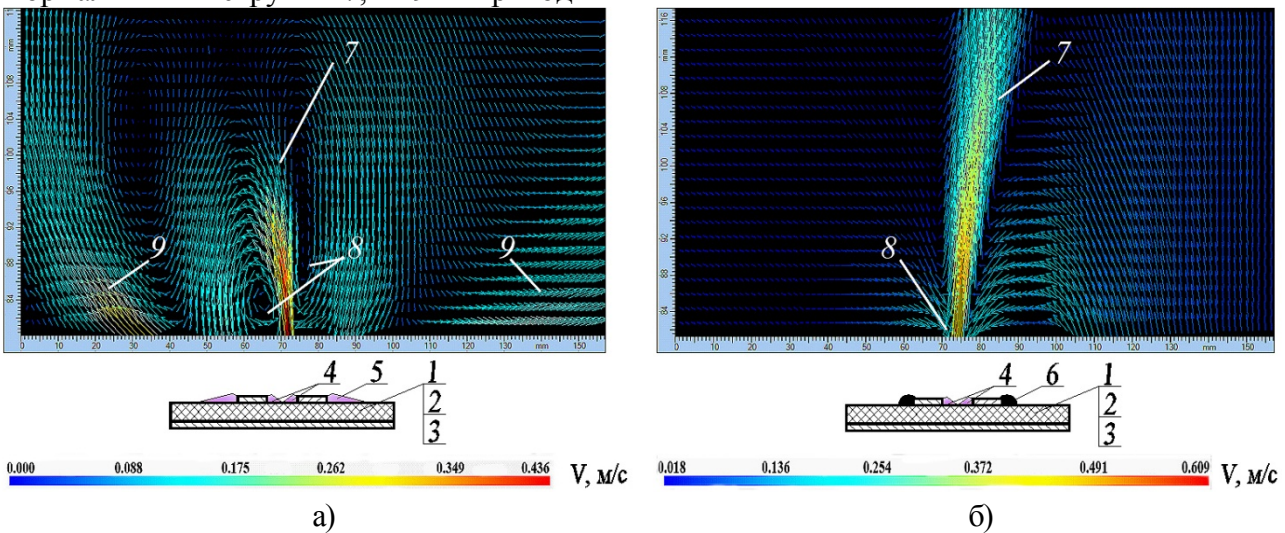
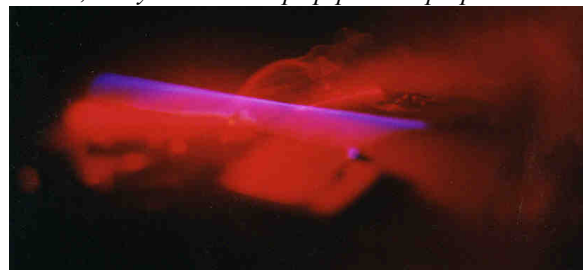
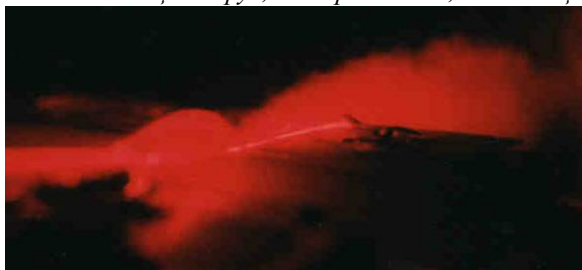


Рис. 9. Формирование синтезируемых струй, ориентированных по нормали к поверхности электродной системы при совместной генерации встречных и периферийных ЧПР а) и изоляции периферийных кромок б): 1-3- электродная система ЧПР; 4-встречные поверхностные разряды; 5-периферийный разряд; 6-изоляционное покрытие кромок; 7-отходящая струя; 8-вихревая зона; 9-тангенциальные потоки, возбуждаемые периферийным разрядом



а) б)

Рис. 10. Примеры структур газовых потоков, формируемых вращающимся ротором в электродной системе ОПР, без подачи напряжения а) и с подачей напряжения б)

Взаимодействие разряда с внешним течением может происходить при принудительном отклонении оси отходящей струи от нормали к поверхности диэлектрика. Для этого на разрядные электроды ЧПР необходимо подать напряжения с разной амплитудой U [28]. Практическое использование такого эффекта открывает дополнительные возможности взаимодействия плазмы с дозвуковыми потоками.

На рис. 10 представлены результаты визуализации течений, формируемых у поверхности роторной системы (рис. 2) в неподвижном воздухе [20]. Линейная скорость

перемещения ротора не превышала 4-5 м/с, что обеспечивало увлечение попутных масс газа вращающейся поверхностью (рис. 10а). Зажигание ОПР с $|U| > 14$ кВ приводило к передаче зарядами дополнительного кинетического импульса приповерхностному течению. Это выражается на рис. 10 б в увеличении протяженности дугообразных траекторий частиц визуализирующего дыма и подтверждает определяющую роль разряда в увеличении скорости газа в пограничном слое [19]. Эффект ускорения потока ОПР был также отмечен с

применением анемометра типа АТТ-1002 и модели крутильных весов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в зависимости от конфигурации электродной системы и режима генерации, поверхностные разряды могут быть использованы как для формирования, так и для подавления вихревых структур в пограничном слое. В тоже время на скоростные параметры формируемых течений оказывают влияние параметры диэлектрического барьера и уровни прикладываемых напряжений U . Согласно зарубежным источникам [15, 23, 28], стационарные электродные системы ЧПР способны разгонять поток до 3-10 м/с. Для этого необходимо использовать высоковольтные источники питания с $U \geq 20$ кВ и $dU/dt > 109$ В/с.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013гг» (Проект П939), а также грантов РФФИ 08-08-99124-р_офи и 12-02-00992-а.

Библиографический список

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824с.
2. Шлихтинг, О. Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. -712 с.
3. Чжен, П. Отрывные течения. Т.1 - М.: Мир 1979. - 279 с.
4. Бойко, А.В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях – Новосибирск.: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. - 328 с.
5. Терещенко Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. М.: Машиностроение, 1987. – 167с.
6. Климнюк, Ю.И. Оптимизация конструкций компрессоров авиационных ГТД с учетом воздействия эксплуатационных неоднородностей воздушного потока - Самара: СГАУ, 2001. – 248 с.
7. Завершинский, И.П. Нелинейные волны в слабоионизованной плазме. – Самара: СГАУ, 2000.-110с.
8. Суржииков, С.Т. Физическая механика газовых разрядов – М.: МГТУ им. М.Э. Баумана, 2006. – 640с.
9. Патент № 2107010 РФ, МКИ В 64 С 21/02 23/00 30/00 Способ обеспечения безударного сверхзвукового движения летательного аппарата в атмосфере и летательный аппарат / А.Ф. Александров, С.Н. Чувашев, И.Б. Тимофеев. - Оpubл. 20.03.98. Бюл.№8.
10. Fomin V.M., Tretyakov P.K., Taran J.P. Flow control using various plasma and aerodynamic approach// Aerospace Science & Technology 2004.-v.8-pp. 411-421.
11. Журавлев, О.А., Поверхностные разряды для снижения аэродинамического сопротивления тел/ Ивченко А.В., Шахов В.Г.// Тез. докл. Международной конференции "Проблемы и перспективы развития авиа-двигателестроения в Поволжском регионе" - Самара: СГАУ, 1999.-С.224-226.
12. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том 2. / под ред. В.Е. Фортова. - М.: Наука, 2000.- 634с.
13. Развитие газодинамических возмущений из зоны распределенного поверхностного скользящего разряда/И.А. Знаменская, Д. Ф. Латфуллин, А.Е. Луцкий и др.//Журнал технической физики -2007.-Т.77, в.5. - С.10-18.
14. Скользящий электродуговой разряд как способ управления траекторией полета летательного аппарата/ В.В. Аксенов, В.В. Голуб, С.А. Губин и др./Письма в ЖТФ- 2004. Т.30, в.20-С62-68.
15. Журавлев О.А., Некрасов В.В., Шорин В.П. Исследование процессов формирования плазменных электродов импульсных и импульсно-периодических СО2-лазеров атмосферного давления - Самара: НПО "Импульс", 1997.-140с.
16. Corke T.C., Post M.L., Orlov D.M. SDBD plasma enhanced aerodynamics: concepts, optimization and applications // Progress in Aerospace Science, 2007, V.43. – P.193-217.
17. Завершинский И.П., Коган Е.Я. Сопротивление тел при возбуждении поверхностного разряда на обтекаемой поверхности // Тез. докл. X конфер. по физике газового разряда. - Рязань: РГРТА, 2000.- С.199-200.

18. Минаев И.М., Рухадзе А.А. Газодинамические характеристики газа при иницировании скользящим разрядом ударной волны в сверхзвуковом потоке // Краткие сообщения ФИАН по физике - 2004.- №3-С.22-27.
19. Барьерная корона постоянного тока: процессы формирования и примеры применения / О.А.Журавлев, А.В. Ивченко, И.А. Бакулин, А.Ю. Стрельников; Под редакцией В.П. Шорина. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2010. 183 с.
20. Патент № 2106049 РФ, МКИ H01 S 3/0977 Устройство возбуждения однородного поверхностного разряда в плотных газах / О.А. Журавлев, А.О. Ситкин, А.И. Федосов - Оpubл. 27.02.98. Бюл.№6.
21. Ivchenko A.V., Zhuravliov O.A., Shakhov V.G. Optical Visualization of the Gas Heat Streams Formed by Frequency Surface Discharge on Circular Cylinder in Cross-Flow// Proceedings of International Conference on the Methods of Aerophysical Research –Novosibirsk 2010.-6р.
22. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда - М.: Изд-во МГУ, 1989.-176с.
23. Santhanakrishnan A. Jacob J. D. Flow control with plasma synthetic jet actuators// Journal of Physics D: Applied Physics 2007.- V.40, P. 637-651.
24. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте/ В.М.Бойко, А.М. Оришич, А. А. Павлов, В.В. Пикалов -Новосибирск: НГУ, 2009.- 450с
25. Журавлев, О.А. Визуализация газовых потоков, возбуждаемых частотным поверхностным разрядом в воздухе атмосферного давления/ Журавлев О.А., Ивченко А.В. // Материалы Всеросс. конфер. ФНТП-2007, Т.1.Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ С.82-86.
26. Исследование процессов переноса газа под воздействием незавершенного поверхностного разряда в асимметричной системе электродов / А.В. Ивченко, О.А. Журавлев, Е.В. Тарасова, и др.//Материалы МНТК "Проблемы и перспективы развития двигателестроения", Ч. 1. - Самара: СГАУ, 2009.-С. 171-172.
27. Plasma control of vortex flow on delta-wing at high angles of attack / A.D. Budovsky, B.Yu. Zanin, A.A. Sidorenko et al// Proceedings of International Conference on the Methods of Aerophysical Research. Part 1–Novosibirsk 2008.- P.137-138.
28. Aerodynamic plasma actuators: A directional micro-jet device/ N. Benard, J. Jolibois , E. Moreau et al // Thin Solid Films -2008. - V.516, i.19 - P.6660-6667.

GAS-DISCHARGE GENERATION OF NEAR-WALL FLOWS

© 2012 A.V. Ivchenko, O. A. Zhuravliov, V. G. Shakhov

Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Reserch University)

The paper presents results of gas jets study generated by surface discharges in air at atmospheric pressure applied to the problems of flows control. The possibility of large eddies destruction by near-wall jet is shown. For modification of boundary layer by surface discharge, the electrode system configurations are discussed.

Boundary layer, electrodes system, surface discharge, near-wall jet, visualization, PIV-measurements.

Информация об авторах

Ивченко Алексей Викторович, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fgrt@yandex.ru. Область научных интересов: физика газового разряда, оптические методы исследования потока.

Журавлев Олег Анатольевич, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет

имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: aseu@ssau.ru. Область научных интересов: физика газового разряда, лазерные системы.

Шахов Валентин Гаврилович, заведующий кафедрой аэрогидродинамики Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: shakhov@ssau.ru. Область научных интересов: теория пограничного слоя, вычислительная и экспериментальная аэродинамика.

Ivchenko Alexey Victorovich, associated professor of Engine Production Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: fgrrt@yandex.ru. Area of research: Physics of gas discharge, optical methods for flow research.

Zhuravlev Oleg Anatolevich, professor of Automatic Systems Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: aseu@ssau.ru. Area of research Physics of gas discharge, laser systems.

Shakhov Valentin Gavrilovich, head of the Aerohydrodynamics Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: shakhov@ssau.ru. Area of research: Theory of boundary layer, computation and experimental aerodynamics.