

УДК 533.951

## Воздействие плазмы, индуцированной лазерным бесселевым пучком, на воздушный вихрь

С.С. Бычков, С.С. Бычков-мл., И.А. Моралев, Л.Н. Пятницкий, Н.В. Третьякова

*Работа посвящена проблеме управления параметрами вихревых потоков, образующихся в природе и во многих технических приложениях, например, при обтекании летящего тела. Впервые нитевидные плазменные каналы сформированы внутри воздушного вихря. Зарегистрирована перестройка структуры течения за фронтом цилиндрической ударной волны.*

PACS: 52.50.Jm, 52.35.Tc, 47.32.cd

*Ключевые слова:* аксикон, бесселев пучок, плазменный канал, цилиндрическая ударная волна, вихрь, поле скорости.

### Введение

Проблема управления вихревым течением, включая частный случай разрушения вихря, является важной практической задачей. Широкое распространение для этих целей получило использование электрических разрядов разного типа. Однако практическое применение этого подхода ограничено необходимостью размещения в контактной зоне электродов и подвода к ним высокого напряжения. Бесконтактный способ воздействия можно осуществить, например, фокусировкой электромагнитного излучения в выбранное место газового течения.

Обычная сферическая оптика создает зону тепловыделения, размеры которой малы по сравнению с характерными масштабами неоднородностей потока. С целью увеличить протяженность этой зоны предлагается применить специальные оптические элементы с конической образующей (аксиконы). В этом случае формируются волновые пучки с большой длиной Рэлея (т.н. бесселевы пучки) [1]. Если интенсивность греющего излучения на оси такого пучка превышает порог пробоя среды, то в газе образуется узкий, вытянутый в одном направлении канал плотной горячей плазмы. Длина канала в принципе не ограничена и (при соответствующем выборе параметров падающего излучения и фокусирующего элемента) может быть сделана сравнимой с размерами вихря.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния генерируемых в поле лазерного бесселева пучка плазменных каналов, а также возникающих при их радиальном расширении ударных волн [2] на воздушный вихревой поток.

**Бычков Сергей Сергеевич**, ст. научный сотрудник.

**Бычков-мл. Сергей Сергеевич**, ведущий инженер.

**Моралев Иван Александрович**, зав. сектором.

**Пятницкий Лев Николаевич**, советник.

**Третьякова Наталья Владимировна**, мл. научный сотрудник.

Объединенный институт высоких температур

Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Тел.: 8(495)485-97-54. E-mail: serg-bychkov@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 10 марта 2014 г.*

© Бычков С.С., Бычков-мл. С.С., Моралев И.А.,

Пятницкий Л.Н., Третьякова Н.В., 2014

### Экспериментальная установка

Исследования проводились на стенде, который содержал оборудование для формирования в рабочей секции закрученного потока газа, импульсный греющий лазер и аксикон для генерации протяженного плазменного канала, а также средства диагностики вихревого течения. Стационарный вихрь создавался в замкнутом пространстве в прозрачной кварцевой трубе. Внутренний диаметр трубы составлял 53 мм. Источником вкладываемой энергии служил импульсный твердотельный лазер, излучающий на длине волны 1,054 мкм. Энергия импульса достигала 10 Дж при длительности 6–8 нс. Кольцевая форма падающего на аксикон пучка обеспечивала оптический пробой среды на регулируемом удалении от аксикона. Мгновенные поля скорости газа в выбранном сечении вихревого потока регистрировались стерео PIV (Particle Image Velocimetry) методом по смещению пробных частиц за фиксированный промежуток времени.

### Результаты измерений

Эксперименты были выполнены при разной пространственной ориентации области энерговклада относительно оси вихря. Во всех случаях каналы лазерной плазмы длиной до 3,5 см были сформированы внутри вихря. Характеристики течения измерялись в разные моменты времени от начала оптического пробоя. При этом параметры, характеризующие невозмущенное течение, поддерживались одинаковыми. Полученные после обработки поля трех компонент скорости газа позволили проследить динамику распространения возникающей цилиндрической ударной волны через зоны вихря, окружающие область пробоя, а также движение наведенного теплового следа.

В качестве примера, на рис. 1 приведена фотография исследуемого сечения вихря, вырезанного лазерным ножом и заполненного пробными частицами малого размера. Изображение получено через 25 мкс после оптического пробоя при фокусировке излучения греющего лазера в поперечном к оси вихря направлении. Стрелкой на рисунке показано положение фронта ударной волны в данный момент времени. Рис. 2 демонстрирует движение цилиндрической ударной волны через периферийную зону

вихря для случая, когда ось плазменного канала совпадала с осью вихревого потока. Представленное распределение соответствует полю скорости, зарегистрированному через 30 мкс после импульса греющего лазера. В обоих случаях эта волна увлекала за собой газ вместе с взвешенными в нем пробными частицами. Поэтому в области пробы оставалось очень мало частиц, а уплотнение частиц связано с ростом плотности газа за фронтом ударной волны.

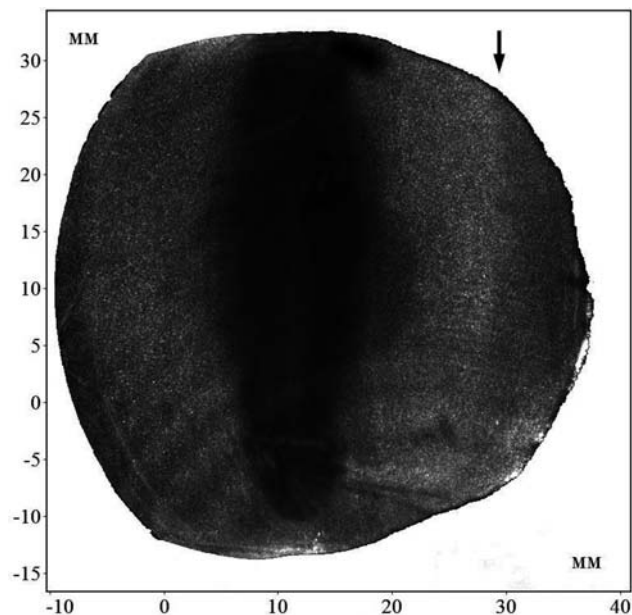


Рис. 1. Фотография расширившейся области оптического пробы внутри вихревого потока с взвешенными в нем пробными частицами.

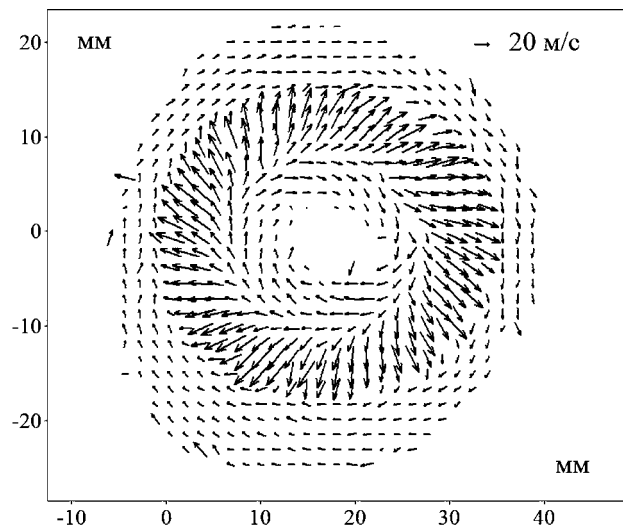


Рис. 2. Типичное поле скорости газа, измеренное при генерации плазменного канала вдоль оси вихря.

При дальнейшей обработке аналогичных рис. 2 полей скорости, измеренных в разные моменты времени, были построены зависимости радиальной компоненты скорости газа от радиуса (рис. 3), по которым можно проследить количественные изменения этой величины в исследуемом сечении. Кривая 6 на этом рисунке соответствовала регист-

рации ударной волны, отраженной от стенки кварцевой трубы. Следует отметить появление за фронтом ударной волны скорости газа, в несколько раз превышающей азимутальную скорость вращательного движения невозмущенного вихря.

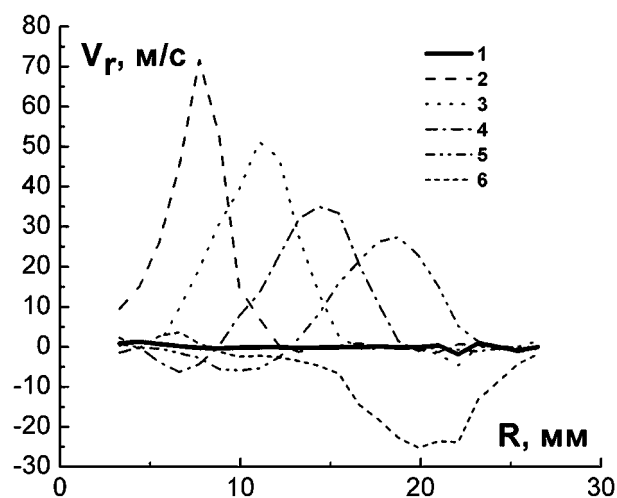


Рис. 3. Зависимости радиальной компоненты скорости газа от радиуса в невозмущенном вихре (1) и через 14 мкс (2), 20 мкс (3), 30 мкс (4), 40 мкс (5) и 75 мкс (6) после импульса греющего лазера.

Таким образом, впервые удалось сформировать нитевидные плазменные каналы внутри воздушного вихря и зарегистрировать перестройку структуры течения за фронтом цилиндрической ударной волны. Это позволяет рассчитывать на эффективность предлагаемого метода для управления параметрами воздушного вихря.

### Заключение

Впервые продемонстрирована принципиальная возможность создания в закрученном потоке плазменных каналов субмиллиметрового диаметра, длина которых сравнима с поперечным размером вихря. Другими словами, оптический пробой в поле бесселева пучка может с успехом заменить электрический разряд, являясь дистанционным и бесконтактным способом доставки энергии в нужное место газового потока. В лабораторных условиях было показано, что образование цилиндрических ударных волн и сопутствующее течение газа значительно изменяют структуру вихревого движения по всему сечению вихря, что позволяет рассчитывать на эффективность предлагаемого метода для управления его параметрами.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект №11-08-01135-а).

### Литература

1. Пятницкий Л.Н. Волновые бесселевы пучки. – М.: Физматлит, 2012.
2. Bychkov S.S., Bychkov (Jr.) S.S., Pyatnitsky L.N., Tretyakova N.V. / Proceedings of the 11th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2012. P. 323-327.

## Impact of the Bessel beam plasma on a vortex

*S. S. Bychkov, S. S. Bychkov-Jr., I. A. Moralev, L. N. Pyatnitsky, and N. V. Tretyakova*

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
Bd.2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: serg-bychkov@yandex.ru

*Received March 10, 2014*

*The work is devoted to a problem of the vortex flow control which is forming in the nature and in many development works, for example, at airflow of a flying body. For the first time threadlike plasma channels were formed in an air eddy. Structure transformation of a current behind the front of a cylindrical shock wave is registered.*

PACS: 52.50.Jm, 52.35.Tc, 47.32.cd

*Keywords:* axicon, Bessel beam, plasma channel, cylindrical shock wave, vortex, velocity field.

### References

1. L. N. Pyatnitsky. *Wave Besselian Beams* (Fizmatlit, Moscow, 2012) [in Russian].
2. S. S. Bychkov, S. S. Bychkov (Jr.), L. N. Pyatnitsky, and N. V. Tretyakova, in *Proceedings of the 11th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics* (2012), pp. 323-327.