

Вихревое движение лазерной плазмы

© А.А. Воскобоев, В.С. Межевов, М.Д. Таран, С.П. Яцков

Государственный научный центр РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,
108840 Москва, Троицк, Россия
e-mail: voskoboev.a@triniti.ru, mezhevov@triniti.ru

Поступило в Редакцию 21 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2024 г.

Принято к публикации 25 апреля 2024 г.

Наблюдались тороидальные плазменные вихри, образующиеся при воздействии излучения импульсно-периодического CO_2 -лазера на пирографитовую мишень в атмосфере гелия. Представлены результаты численного расчета модели эксперимента, соответствующие эксперименту. При длительности лазерного импульса $3 \mu\text{s}$ показано время существования тороидальных колец более $100 \mu\text{s}$.

Ключевые слова: плазма, плазменные вихри, импульсно-периодический CO_2 -лазер.

DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58126.290-23

Введение

Исследованию плазменных вихрей, образующихся при истечении плазмы в импульсных плазмотронах посвящено много исследований [1–7]. Особенное внимание уделяется тороидальным вихревым образованиям, обладающим большой стабильностью, длительностью существования и направленностью движения. Есть предположение [1], что такое движение плазмы может способствовать возникновению шаровой молнии.

Для изучения вихревого движения плазмы в газовой среде используются плазмотроны небольшого объема цилиндрической формы [5,6], которые отделены с выходной стороны тонкой разрушаемой возникающим высоким давлением перегородкой. Плазма создается электрическим разрядом в газе, заполняющим плазмотрон с длительностью 10^{-4} – 10^{-3} с с удельным энерговыделением от 0.01 до 3 kJ/cm^3 . После разряда плазма истекает в воздух или в заполненный газом объем, при этом истечение плазмы из разрядной камеры сопровождается образованием плазменных вихрей.

При проведении наших исследований по напылению алмазоподобных покрытий с помощью импульсно-периодического CO_2 -лазера, представленных в работе [8], было обнаружено возникновение плазменной „струи“. Для объяснения этого эффекта были проведены ряд измерений и численные расчеты, которые показали возможность возникновения крупномасштабных плазменных вихрей при импульсном лазерном воздействии.

1. Описание экспериментальной установки

В экспериментах [8] применялся импульсно-периодический CO_2 -лазер с замкнутым газовым контуром и частотой повторения импульсов до 200 Hz. Импульс излучения с энергией 1.2 J состоял из пика

длительностью около $0.3 \mu\text{s}$ по основанию и спадающего хвоста длительностью $3 \mu\text{s}$. Пиковая мощность лазерного излучения составляла порядка 1.5 MW. Временная форма импульса излучения представлена на рис. 1.

Излучение импульсно-периодического CO_2 -лазера фокусировалось линзой из KCl с фокусным расстоянием 26 см на мишень, установленную в цилиндрической камере длиной 15 см и диаметром 13 см через окно из KCl. Диаметр сфокусированного излучения на поверхности мишени около 0.6 mm. Плотность мощности лазерного излучения в фокусе линзы составляла $6 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$.

Через боковые окна камеры проводилось фотографирование, временная и спектральная диагностика излучения плазмы. Изображение плазмы проецировалось с помощью линзы на торец оптического волокна диаметром

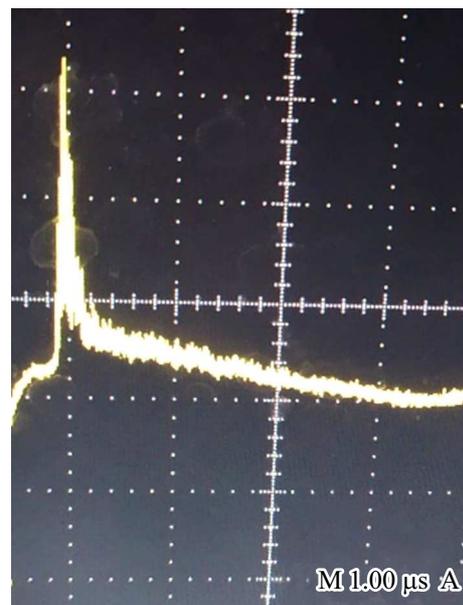


Рис. 1. Форма импульса излучения.

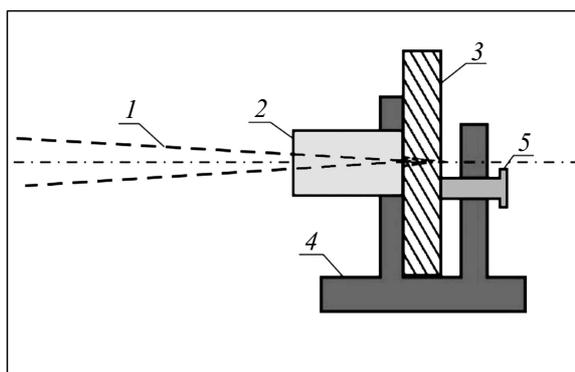


Рис. 2. Схема закрепления мишени: 1 — лазерный луч, 2 — трубка, 3 — мишень, 4 — подставка, 5 — система крепления мишени.

200 μm , установленного в плоскости изображения. Торцы волокна мог перемещаться в плоскости изображения. Оптическое волокно соединялось с фотоприемником типа PDA36A-EC фирмы THORLABS, подключенным к осциллографу. Камера откачивалась безмаслянным насосом до давления 50 Па.

Эксперименты по взаимодействию проводились с использованием мишени пирографита толщиной 4 мм. На рис. 2 представлена схема установки мишени.

Мишень закрепляется на подставке, которая могла перемещаться вдоль оси луча. На той же подставке устанавливалась трубка из нескольких слоев никелевой фольги, которая торцом плотно прижималась к поверхности мишени. Трубка устанавливалась для возможности создания направленного движения углеродной плазмы к напыляемому образцу. Длина трубки — 16 мм, внутренний диаметр — 10 мм, толщина стенки — 0.2 мм.

2. Экспериментальные результаты

Камера взаимодействия вакуумировалась и заполнялась гелием до давления 4000 Па. При частоте повторения импульсов более 10 Hz в начальный период наблюдался плазменный поток (рис. 3).

После увеличения частоты повторения импульсов до 10–50 Hz через 1–2 мин взаимодействия вид плазмы существенно изменяется (рис. 4, а).

Интенсивность свечения плазмы на срезе трубки во время длительной работы существенно падает, появляется „струя“, наблюдаемая визуально только при импульсно-периодическом режиме (более 10 Hz) из-за низкой интенсивности свечения плазменных потоков. О вихревом движении указывают форма плазменного образования на срезе трубки и прямолинейное движение без поперечного расширения более чем на 10 калибров трубки. Поперечный размер вихревого образования в 2 раза превышает внутренний диаметр трубки. Диаметр лазерного луча на входе трубки составляет около 2 мм.

С помощью спектрометра Thorlabs CCS100 были сняты спектры и оценен качественный состав плазмы. На рис. 5 представлен спектр, полученный вначале облучения мишени, с фокусом спектрометра, настроенным на середину плазменного образования на расстоянии 10 мм от трубки. Спектр качественно характерен как для рис. 3 так и для 4, б.

Зелено-голубой цвет объясняется полосами Свана для радикалов углерода C_2 в области 460 и 520 нм, образующимися в процессе охлаждения углеродной плазмы. Красный цвет обусловлен линиями He на 587, 656 и 667.9 нм.

На рис. 6 представлен спектр, характерный для плазменных образований, показанных на рис. 4, а, полученный в центре плазменного образования на расстоянии 20 мм от трубки.

Видна полоса CN — 388 нм и три интенсивные линии гелия HeI — 587, 667.9 и HeII — 656 нм. Полосы Свана практически не различимы.

Распределение интенсивности в изображении плазменного потока (меньшая интенсивность в центральной части) и прямолинейность движения на большом расстоянии от среза трубки указывают, по нашему мнению, на тороидальное вихревое движение плазмы. Слабая интенсивность свечения тороидального вихря не позволяет осуществить скоростную съемку, поэтому для

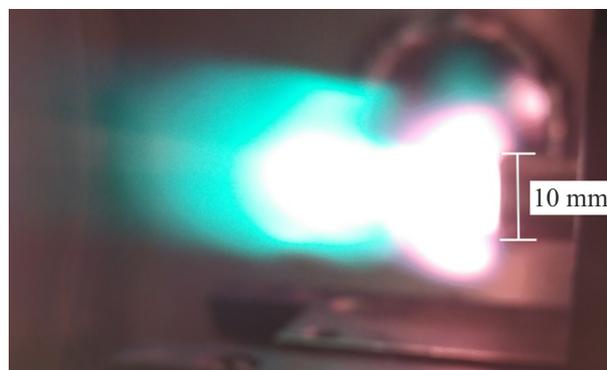


Рис. 3. Интегральная по времени фотография плазмы (одного импульса) в начале процесса облучения, при времени выдержки 1 с.

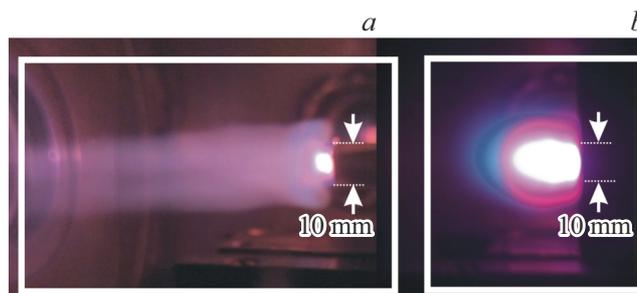


Рис. 4. Фотографии плазменных образований, экспозиция 1 с, при частоте повторения 10 Hz: а — с трубкой, б — с отверстием в графите.

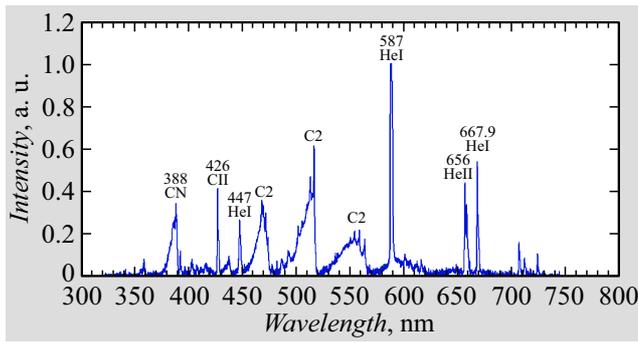


Рис. 5. Спектр излучения плазменных образований при начальных импульсах.

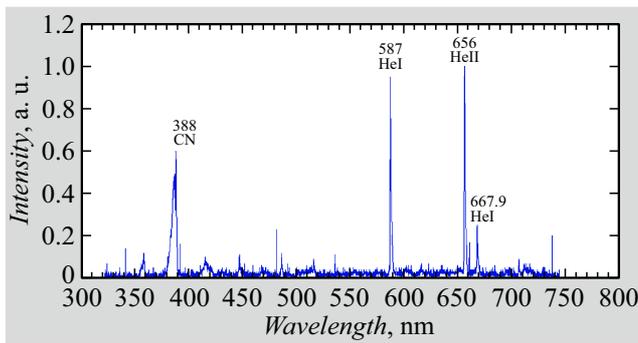


Рис. 6. Спектр излучения плазменных образований при длительном облучении в „струе“.

исследования временных характеристик плазменного потока был использован фотодетектор с оптоволоконным входом. Осциллограммы свечения плазмы от одного импульса на оси плазменного потока на срезе трубки (a) и на расстоянии 4 см от среза (b) представлены на рис. 7.

Первый пик на рис. 7, b определяется отражением свечения плазмы из трубки на внутренних поверхностях камеры, при этом чувствительность фотоприемника значительно увеличена регулировкой коэффициента усиления предварительного усилителя.

Средняя скорость движения вихря вдоль оси трубки, определенная по временной задержке, составляет около 450 м/с. Свечение плазмы на срезе трубки начинается через 4 мкс после начала воздействия лазерного излучения на поверхность мишени.

Изменение режима взаимодействия с мишенью, по всей видимости, связано с образованием конусной полости в графитовой мишени с входным диаметром 0.8 мм и глубиной 3 мм, что уменьшает плотность энергии лазерного излучения на поверхности углеродной мишени и соответственно плотность паров углерода. В этом случае малая концентрация паров углерода обеспечивает лазерный пробой и поглощение лазерного излучения в гелии, при этом образуется в основном гелиевая плазма (что подтверждается регистрацией спектра излучения

плазменных вихрей). Далее происходит газодинамический процесс расширения плазменного образования и выравнивания давления в трубке, а затем процесс исечения плазмы.

Для подтверждения этого предположения было сфотографировано плазменное образование вблизи мишени без формирующей трубки после образования конусного отверстия. Фотография плазменного образования (от одного импульса) представлена на рис. 8. Для наблюдения структуры плазменного образования применялся нейтральный фильтр с ослаблением в 3 раза. На фото наблюдается зона максимального нагрева плазмы, диаметром около 3 мм и длиной около 10 мм, что существенно отличается от структуры плазменного образования в вакууме в тех же условиях [8].

Оценка температуры сделана по измерениям спектра в работе [8], где температура определялась на расстоянии 18 мм от мишени и составляла около 6000 К.

Следует отметить, что на образование плазменных вихрей влияла форма выходного отверстия трубки. Были проведены эксперименты с отверстием в массивном графите с параметрами, аналогичными с размерами трубки (диаметр 10 мм, глубина 16 мм). В такой конфигурации плазменных, долго живущих образований, не наблюдалось. Фотография плазменных образований в этом случае представлена на рис. 4, b. В наших экспериментах, по-видимому, тонкостенный выходной конец трубки облегчает возникновение тороидальных вихрей.

При использовании в качестве мишени медной пластины вихревое тороидальное движение плазмы также наблюдалось, но интенсивность свечения плазменных образований была существенно слабее.

Вихревое движение наблюдалось в диапазоне давления гелия от 10 до 100 (1330–13000 Torr (Pa)).

3. Численные эксперименты

Для оценки параметров течения, возникающего вблизи трубки, с геометрическими размерами трубки, использованными в эксперименте, при одиночном импульсе лазерного излучения были проведены численные эксперименты с помощью пакета ANSYS 2021R2 [9], программы Fluid Flow (Fluent) (лицензия: Customer # 1084164).

При численном моделировании натурального эксперимента выбрана замкнутая, осесимметричная расчетная область. Металлическая цилиндрическая трубка с толщиной стенки 1 мм и внутренним радиусом 5 мм прикреплена к левой границе расчетной области, так, что ось трубки совпадает с осью z расчетной области, длина трубки составляет 16 мм. Размер расчетной области вдоль оси z — $L_z = 56$ мм, радиус расчетной области $r = 65$ мм. Для описания течения среды была выбрана модель идеального газа (гелия), в

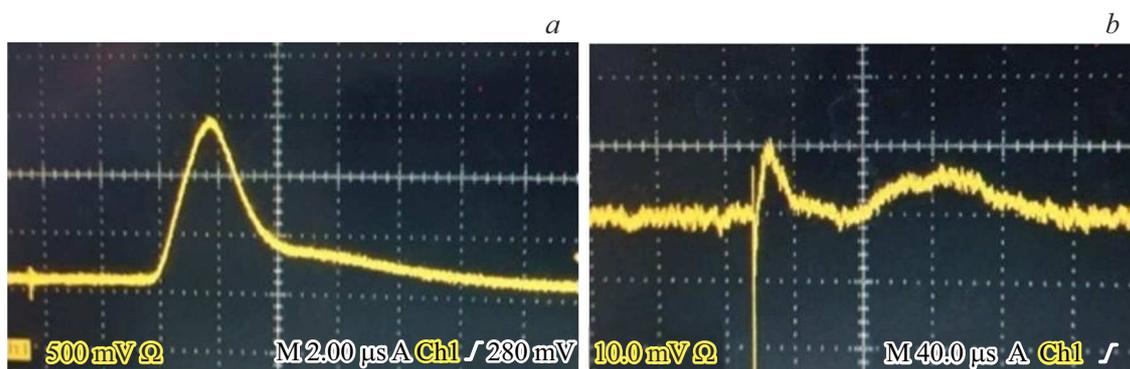


Рис. 7. Осциллограммы свечения плазмы на срезе трубки (а) и на 4 см от среза (b).

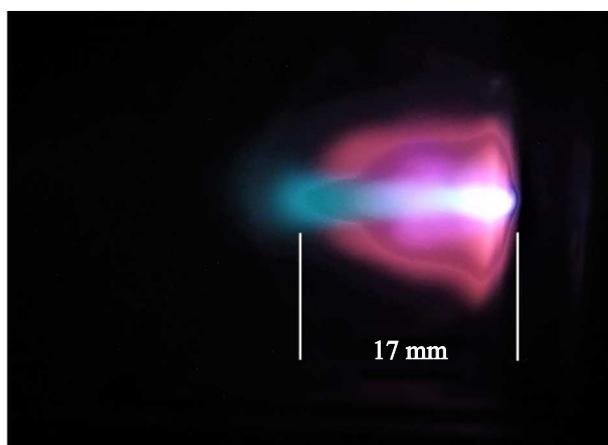


Рис. 8. Интегральная по времени фотография плазмы в отсутствие трубки при образовании конусного кратера.

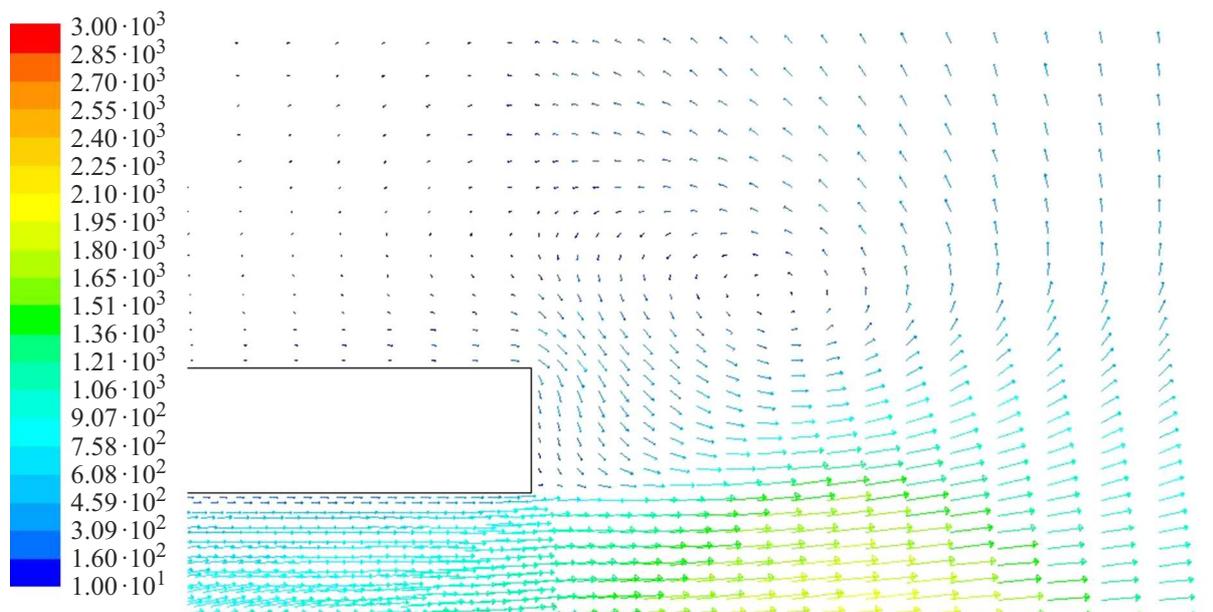


Рис. 9. Распределение вектора скорости в расчетной области в момент времени $t \approx 10.4 \mu\text{s}$.

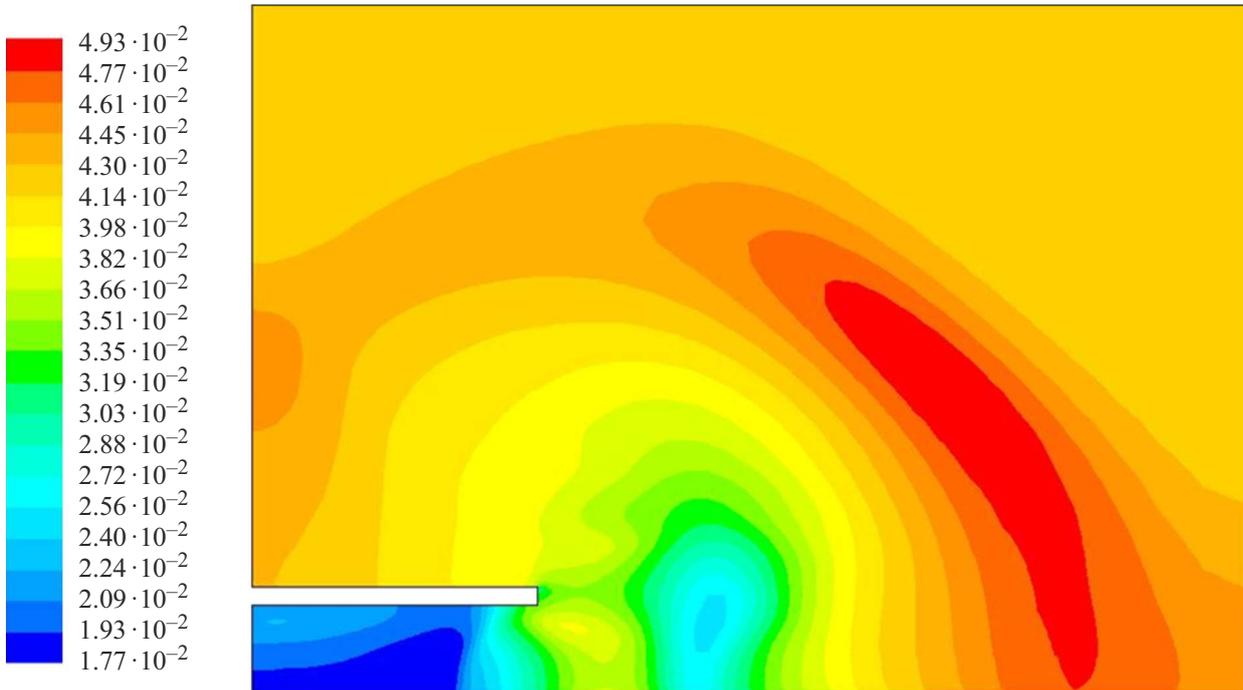


Рис. 10. Распределение давления в расчетной области в момент времени $t \approx 24.0 \mu\text{s}$.

осесимметричной геометрии с учетом теплопроводности в предположении ламинарной модели вязкости и решались полные уравнения Навье–Стокса. Отметим, что в данном варианте (и это нами проверялось численно) для адекватного описания вихревого движения достаточно было использовать уравнения Эйлера, не учитывающие эффекты теплопроводности и вязкости, поскольку за время расчета эти эффекты „не успевают“ повлиять на характер течения, а вихрь формируется за счет неоднородного поля давления. Никакие плазменные эффекты в модели не учитывались. Так же не учитывалось наличие в газе примесей углерода, все эффекты с поглощением энергии на этой примеси выразились в температурном поле в начальный момент времени. На жестких границах области были поставлены условия нулевой скорости и выбрана ламинарная модель вязкости.

Фоновое давление гелия в камере составляет $P_0 \approx 0.04 \text{ atm} \approx 30 \text{ Torr} \approx 4000 \text{ Pa}$.

В начальный момент времени на постоянном фоне плотности создается возмущение температуры вблизи оси и начале координат, которое соответствует распределению максимальной интенсивности свечения, показанном на рисунке 8, в виде

$$T_0[\text{K}] = 300 + 10^4 \cdot \exp(-r^2/4 \cdot 10^{-6} - z^2/1.96 \cdot 10^{-4}).$$

Здесь температура в Кельвинах, расстояние в метрах.

При расчете считалось, что вся энергия лазерного импульса поглощается в гелии в центральной части трубки в соответствии с рис. 8. Расчетный максимум

давления находится в начале координат и составляет $P_{\text{max}} \approx 1.42 \text{ atm}$ и расчетный максимум температуры составляет $T_{\text{max}} = 10\,300 \text{ K}$.

На рис. 9 показано поле вектора скорости в расчетной области на момент времени $t \approx 10.4 \mu\text{s}$. Видно, что центр образовавшегося вихря находится приблизительно в 2 mm от верхнего края формирующей трубки и приблизительно на 1 mm выше внешней ее поверхности. Максимальное значение скорости в расчетной области, есть $V_{\text{max}} \approx 3000 \text{ m/s}$. Вихрь образуется, очевидно, за счет образовавшегося распределения давления.

На рис. 10 представлено поле давления в расчетной области в момент времени $t \approx 24.0 \mu\text{s}$. Видно, что максимальное давление упало и превышает фоновое значение приблизительно на 20%, а минимальное значение практически не изменилось, но находится внутри кольца.

Так же имеется область пониженного давления (приблизительно в 1.5 раза ниже фонового, в минимуме, правее среза примерно на 10 mm). На рис. 11 показано поле вектора скоростей в расчетной области на этот же момент времени. Видно, что центр вихря существенно переместился вглубь расчетной области и находится от среза трубки в 10 mm и практически на уровне внешней границы кольца. Оценка скорости перемещения центра вихря вглубь области составляет $V_{\text{vor}} \approx 570 \text{ m/s}$. Максимальное значение скорости потока в этот момент времени составляет $V_{\text{max}} \approx 1500 \text{ m/s}$. На данный момент времени характерный радиальный размер вихря составляет $L_r \approx 14 \text{ mm}$, а аксиальный $L_z \approx 20 \text{ mm}$.

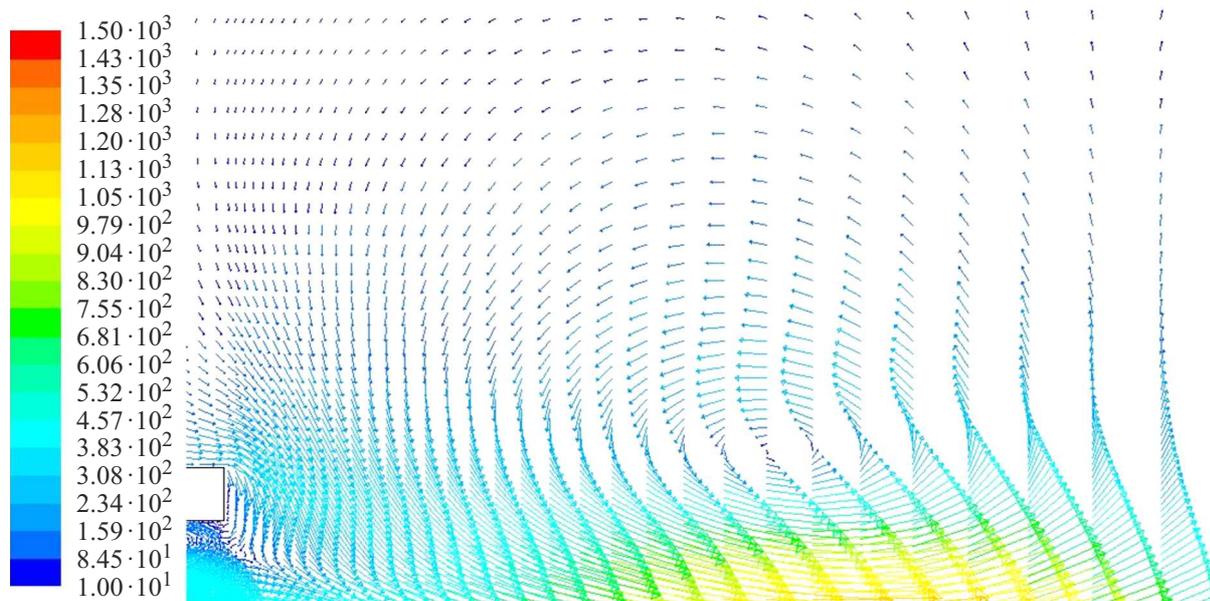


Рис. 11. Распределение вектора скорости в расчетной области в момент времени $t \approx 24.0 \mu\text{s}$.

Заключение

При импульсно-периодическом взаимодействии импульсного излучения CO_2 -лазера с графитовой мишенью и установленной вблизи фокуса трубкой, формирующей плазменный поток, наблюдалось образование долгоживущих плазменных вихрей.

Длительность существования плазменных вихрей превышает $100 \mu\text{s}$ при длительности лазерного импульса $3 \mu\text{s}$.

Возникновение вихрей зависит от временной формы лазерного импульса, состава газовой среды и состояния поверхности мишени.

Численный эксперимент в данном случае показывает, что крупномасштабный вихрь может образоваться и существовать продолжительное время. Превышение давления в высокотемпературной части расчетной области по отношению к фоновому значению соответствует экспериментам с тороидальными плазменными вихрями, проводившимися при атмосферном давлении.

Между натурным и численным экспериментами противоречия нет. Напротив, в численном эксперименте отчетливо проявляется вихревое движение потока, наблюдаемого в натурном эксперименте.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.М. Андрианов, В.И. Сеницын. *ЖТФ*, **47** (11), 1318 (1977).

[2] А.Ф. Александров, Б. Азеддин, М.Г. Скворцов и др. *Тез. докл. IX Всес. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы* (Фрунзе, Илим, 1983), с. 402-403.

[3] А.Ф. Александров, Ю. Бахгат, М.Г. Скворцов, И.В. Тимофеев, В.А. Черников, У. Юсупалиев. *ЖТФ*, **56** (12), 2392 (1986).

[4] А.Ф. Александров, И.В. Тимофеев, В.А. Черников, У. Юсупалиев. *ТВТ*, **26** (4), 639 (1988).

[5] У. Юсупалиев. *ЖТФ*, **74** (7), 52 (2004).

[6] У. Юсупалиев, П.У. Юсупалиев, С.А. Шутеев. *ЖТФ*, **77** (7), 50 (2007).

[7] М.Н. Жарников, А.С. Камруков, И.В. Кожевников, Н.П. Козлов, И.А. Росляков. *ЖТФ*, **78** (5), 38 (2008).

[8] А.А. Воскобоев, А.Н. Кириченко, В.С. Межевов, С.П. Яцков. *ЖТФ*, **93** (11), 1679 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56501.196-23

[9] Электронный ресурс. Режим доступа: URL: <https://www.ansys.com/>