

ВИХРЕВЫЕ КОЛЬЦА И ПЛАЗМЕННЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫЕ ВИХРИ В ОДНОРОДНЫХ НЕОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ. III. ЭФФЕКТ АНИЗОТРОПИИ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ В ВИХРЯХ

У. Юсупалиев¹, С. А. Шутеев², Е. Э. Винке², В. Г. Еленский³

Экспериментально исследован эффект анизотропии процесса диффузии частиц веществ в тороидальных вихрях (ТВ): в плазменном ТВ в воздухе; в вихревых кольцах в воздухе и воде. Суть этого эффекта заключается в том, что коэффициенты диффузии частиц веществ в ТВ в перпендикулярном к оси вращения направлении D_{\perp} намного меньше, чем в параллельном этой оси направлении D_{\parallel} . Определено значение коэффициента D_{\perp} молекул пропана в воздушном ТВ, а также исследована зависимость коэффициента D_{\perp} частиц туши в ТВ воде от угловой скорости вращения ω . Показано, что с ростом ω величина коэффициента D_{\perp} может снизиться в 10–25 раз по сравнению с величиной коэффициента D_{\parallel} .

Ключевые слова: тороидальные вихри, плазменный тороидальный вихрь, анизотропные диффузии.

Высокотемпературные (плазменные) тороидальные вихри (ТВ) в воздухе [1–3] и низкотемпературные ТВ (вихревые кольца) в воздухе и воде имеют общие закономерности процесса их образования и динамики движения [4–11]. Кроме того, такие вихри также имеют идентичные закономерности процессов переноса (диффузии, теплопроводности). В наших работах показано [11–13], что вращательное движение плазмы/газа/жидкости внутри тора приводит к особенностям процессов теплопроводности и диффузии в таких вихрях. Эти особенности заключаются в том, что коэффициенты теплопроводности (диффузии) в перпендикулярном к оси вращения направлении $\chi_{\perp}(D_{\perp})$ намного

¹ ИОФ РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: nesu@phys.msu.ru.

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Воробьевы горы.

³ РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 119992, Москва, Россия.

меньше, чем в параллельном этой оси направлении $\chi_{\parallel}(D_{\parallel})(\chi_{\perp} \ll \chi_{\parallel}, D_{\perp} \ll D_{\parallel})$. То есть наблюдается **эффект анизотропии процессов переноса** в закрученных потоках плазмы/газа/жидкости. Следствием такого эффекта является то, что изначально захваченное в вихревое движение вещество (плазма/газ/жидкость/аэрозольные частицы и др.) при образовании ТВ не теряется из тороидального объёма вплоть до момента распада вихря, что и наблюдается на опыте [1–4, 8, 11–13]. В работах [11–13] нам удалось экспериментально одновременно определить коэффициенты диффузии D_{\perp} и D_{\parallel} аэрозольных частиц в воздушном ТВ в воздухе при атмосферном давлении и частиц туши (краски) в водяном ТВ в воде. Опыты проводились при комнатной температуре ТВ и среды (воздуха и воды).

Заметим, что определить величину указанных коэффициентов в плазменном ТВ экспериментально до сих пор не удалось. А что касается исследования зависимости коэффициента D_{\perp} в вихревых кольцах от угловой скорости вращения ω вещества в вихре, то она практически не изучена. Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании процесса переноса массы тороидальными вихрями (плазменным ТВ в воздухе, газовым ТВ в воздухе и ТВ в воде) и изучении указанной зависимости.

1. Плазменный тороидальный вихрь (ПТВ). Для создания ПТВ в воздухе использовался импульсный плазмотрон, конструкция которого подробно изложена в [1–3]. Плазмотрон был подключен к разрядному контуру с емкостью накопителя электрической энергии 30 мкФ и рабочим напряжением 10–25 кВ. Разрядная камера плазмотрона (с объёмом 60 см³ и диаметром сопла 40 мм) после откачки воздуха до давления 10 Па наполнялась рабочим газом (Xe, Kr) до давления 10⁵ Па. Динамика движения ПТВ и его излучения изучались сверхскоростными фоторегистраторами СФР-2М и спектрографом ИСП-30 соответственно.

Хотя прямое измерение коэффициентов диффузии в ПТВ представляет собой сложную задачу, об анизотропии процесса диффузии в нем можно судить по изменению во времени его химического состава. Для такого исследования состава плазмы, переносимой ПТВ в воздухе, применялся метод регистрации спектра излучения плазмы в начальной стадии движения ПТВ и спектра поглощения – в поздней стадии.

Поскольку максимальное значение температуры ПТВ составляет 7000–10000 К [1–3], а среднее давление в нем не превышает атмосферного, то при таких условиях для определения химического состава плазмы ПТВ можно использовать инертные газы, предпочтительно ксенон или криптон. Дело в том, что, по данным исследований импульсных источников света [14], при таких температурах и атмосферном давлении плазмы в

спектральном диапазоне 800–1100 нм ксенон (криптон) имеет ряд сильно излучающих спектральных линий, соответствующих переходам 6P-6S (5P-5S) возбужденного атома. Эти же переходы для холодного ксенона (криптона) проявляются в виде спектральных линий поглощения, и поэтому рабочим газом плазмотрона были выбраны именно эти газы.

Состав плазменного ТВ. Исследование спектров излучения и поглощения веществ ПТВ показало, что на стадии формирования такого вихря ($t \leq \Delta t_u \approx 150$ мкс – длительность истечения импульсной плазменной струи из сопла плазмотрона в воздух) его спектр излучения является смешанным: на континуум наложены спектральные линии ионов и атомов, входящих в состав рабочего газа (Xe, Kr), электродов (Cu, Al, Fe) и диэлектрической стенки разрядной камеры плазмотрона (ϵ -капролактама), чья молекула состоит в основном из C, H и N. При $t > \Delta t_u$, по мере остывания плазмы в вихре, интенсивность континуума и спектральных линий излучения ионов сильно уменьшается, интенсивные линии атомов Xe и Kr в диапазоне 800–900 нм продолжают светиться, а также появляются излучательные полосы двухатомных молекул CN, C₂, FeO, AlO, CuO. При временах $t \gg \Delta t_u$ (когда вихрь светится слабо) в спектре поглощения ПТВ появляются характерные сильные линии поглощения атомов Xe (Kr) в том же диапазоне. Другими словами, изначально захваченные в вихревое движение ионы и атомы при дальнейшем движении вихря из него не теряются, что косвенно свидетельствует о наличии эффекта анизотропии процесса диффузии в плазменном ТВ.

Появление атомов кислорода в вихре свидетельствует о захвате воздуха в вихревое движение на стадии его формирования, поскольку кислород в исходном химическом составе рабочего газа, электродов и диэлектрической стенки разрядной камеры плазмотрона отсутствует. Причем масса захваченного воздуха составляет 10–15% от общей массы ТВ [3]. Это – во-первых. Во-вторых, при наличии атома кислорода, как показывает анализ, в остывающей плазме вихря в основном происходят экзотермические химические реакции, т.е. в ПТВ выделяется дополнительная тепловая энергия.

2. Перенос горючих газов с помощью вихревого кольца в воздухе. Для создания низкотемпературного тороидального вихря (НТВ) в неограниченном пространстве воздуха при атмосферном давлении использовался генератор ТВ, состоящий из блока поршня, системы запуска рабочего газа, блока толкателя поршня, рабочей камеры и сопла. Описания таких генераторов ТВ приведены в [11–13].

В качестве горючего газа был выбран пропан C_3H_8 (с молекулярной массой 44.09). Известно, что для каждого горючего газа существует минимальная его концен-

трация в воздухе, называемая предельной $N_{\text{ЛМ}}$, при которой смесь может воспламениться, если её температура выше определенной величины. Предельная концентрация воспламенения для пропана в смеси с воздухом составляет 2.3–9.5% (по массе), а температура её воспламенения равна 468 °С [15]. Если сформировать ТВ из смеси горючего газа и воздуха с концентрацией выше $N_{\text{ЛМ}}$ и на различные расстояния z от генератора ТВ поместить зажженные свечи, то ТВ с такой смесью должен воспламениться, что можно регистрировать с помощью видеокамеры. Такая смесь создавалась наполнением пропаном из баллона рабочего объема генератора ТВ с воздухом.

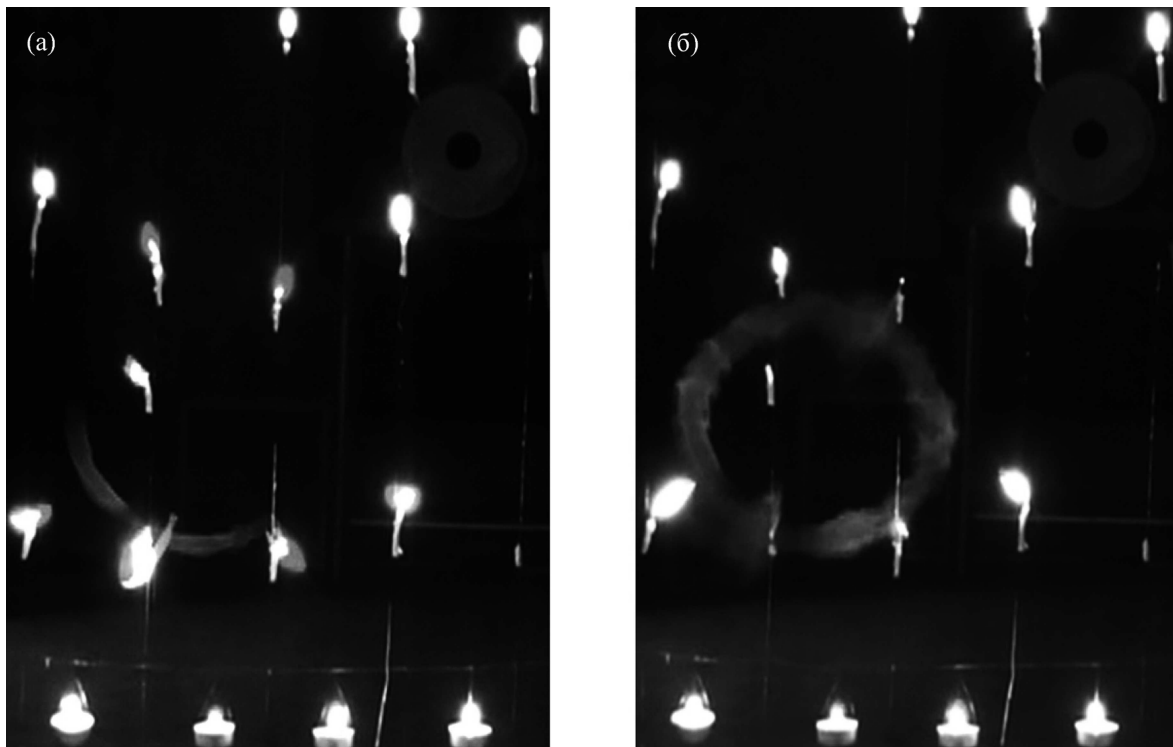


Рис. 1: Процесс воспламенения горючей смеси пропан/воздух в тороидальном вихре в тот момент, когда вихрь дошел до ряда свечей, помещенных на расстоянии $z = 11.5$ м от генератора вихря (темное круглое отверстие на заднем плане – сопло генератора). Длительность экспозиции кадра – 40 мс, (а) начало воспламенения, (б) через 80 мс после начала воспламенения.

Предварительный опыт показал, что при малых расстояниях z ($z \leq 1.5$ – 2.5 м) от генератора ТВ (с соплом диаметром $d_n = 0.1$ м) вихрь с горючей смесью удаётся зажечь с помощью одной свечи. Однако при больших ($z > 5$ м) расстояниях одной свечи не достаточно, так как поступательное движение такого ТВ не является строго прямо-

линейным. Поэтому для большей надёжности поджига ТВ нами изготовлена система свечей, расположенных равномерно в вертикальной плоскости на площади $2 \times 2 \text{ м}^2$. На рис. 1 представлена последовательность кадров процесса воспламенения горючей смеси ТВ, когда вихрь дошел до свечей, расположенных на расстоянии $z = 11.5 \text{ м}$. Этот опыт показывает, что горючая смесь, захваченная в вихревое движение при формировании ТВ, при его дальнейшем движении не теряется из его объема, сохраняя тороидальную форму. Более того, из рис. 1(а) видно, что можно измерить диаметр $2r_{\text{TOR}}$ ядра тора – границы воспламененной горючей смеси, что позволяет определить величину коэффициента диффузии D_{\perp} молекул вращающейся горючей смеси в воздушном ТВ.

Известно [1, 4], что при движении ТВ его масса увеличивается за счёт захваченных им ближайших слоев наружного воздуха. При этом структура ТВ состоит из внутренней и наружной вращающихся областей. Внутренняя область (ядро) заполнена горючей смесью, попавшей туда при формировании ТВ, а наружная область – захваченным воздухом. При движении ТВ молекулы вращающейся горючей смеси диффундируют в наружную область тора (во вращающийся воздух), тем самым расширяя границы ядра, т.е. его радиус r_{TOR} . Поэтому, располагая систему свечей на различных расстояниях $z_1, z_2, z_3 \dots z_i$ от генератора ТВ, можно исследовать зависимость величины $r_{\text{TOR}i}$ от расстояния z_i (по сути, от времени t_i) при заданных начальных условиях. Таким способом можно определить среднее смещение молекул горючей смеси $\Delta r_{\text{TOR}} = r_{\text{TOR}}(t_i) - r_{\text{TOR}}(t_1)$ в радиальном направлении вращения ТВ за время $\Delta t = t_i - t_1$ (в моменты времени t_1 и t_i вихрь с горючей смесью проходит расстояния z_1 и z_i соответственно). За начало отсчёта времени принят момент формирования ТВ.

Далее, предполагая, что закономерности процесса диффузии справедливы и **в поле центробежных сил** тороидального вихря, по известной формуле для процесса диффузии $\Delta r_{\text{TOR}} = \sqrt{6D_{\perp}\Delta t}$ [16, 17] определялось среднее смещение молекул горючей смеси.

Т а б л и ц а 1

| | | | | |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| $z, \text{ м}$ | 6.5 | 7.5 | 8.2 | 8.8 |
| $t, \text{ с}$ | 3 | 4 | 5 | 6 |
| $r_{\text{TOR}}(t_i), \text{ мм}$ | 29 | 31 | 34 | 36 |

В таблице 1 приведены измеренные значения среднего смещения молекул горючей смеси Δr_{TOR} в различные моменты времени при следующих начальных величинах параметров генератора ТВ и вихря: $d_n = 0.1 \text{ м}$; $V_{\text{TBZ}_0} \simeq 4.2 \text{ м/с}$; при начальном радиусе

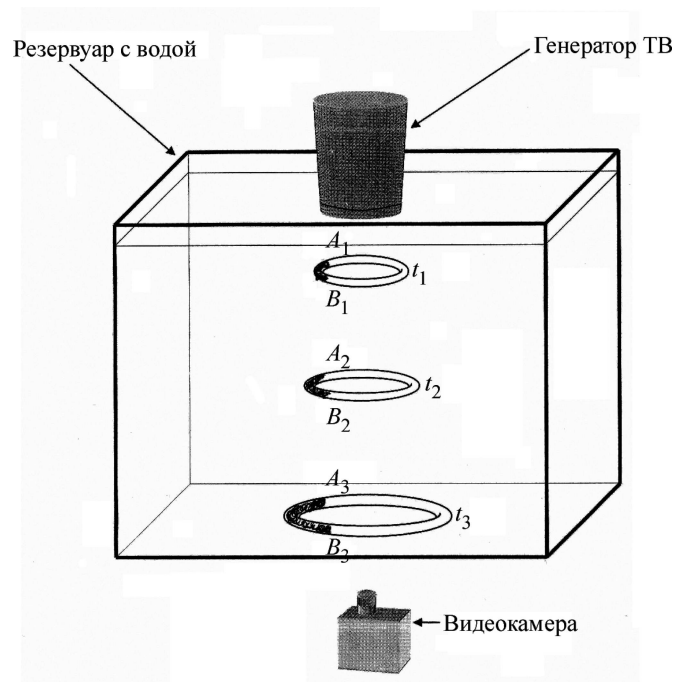


Рис. 2: Схематическое изображение установки для определения коэффициентов диффузии частиц туши D_{\perp} и D_{\parallel} во вращающейся жидкости тороидального вихря в воде. Показана последовательность процесса диффузии частиц туши (темная область ТВ) в моменты времени t_1, t_2 и t_3 . Длина части тора, заполненной тушью в процессе диффузии в ТВ в моменты времени t_1, t_2 и t_3 , равна A_1B_1, A_2B_2 и A_3B_3 соответственно.

вихря $R_{ТВ0} \simeq 0.09$ м; угле расширения радиуса вихря $\alpha \simeq 0.008$. Поскольку при таких начальных параметрах ТВ скорость его поступательного движения на расстояниях $\Delta z = 6.5 - 9.0$ м изменяется слабо и составляет 1.0–0.8 м/с, то для определения величины $r_{ТОР}(t_i)$ система свечей последовательно размещалась на расстояниях $z_1 = 6.5$ м, $z_2 = 7.5$ м, $z_3 = 8.2$ м и $z_4 = 8.8$ м. Значения величины $r_{ТОР}(t_i)$ усреднены по пяти измерениям. При определении величины $r_{ТОР}(t_i)$ основная ошибка связана с повторяемостью опыта и поэтому её величина может достигать до 30%. Из данных таблицы 1 для коэффициента диффузии молекул горючей смеси в перпендикулярном к оси вращения направлении получим, что $D_{\perp} \approx (0.7 - 1.5) \cdot 10^{-6}$ м²/с. Тогда как при тех же условиях (при длине свободного пробега $l \sim 10^{-7}$ м и тепловой скорости $v = 345$ м/с молекул горючей смеси) величина коэффициента диффузии горючей смеси в воздухе составляет $D_{\parallel} = (lv)/3 \approx 10^{-5}$ м²/с. Значение коэффициента D_{\perp} получено при угловой скорости вращения горючей смеси $\omega \approx 100 - 120$ с⁻¹ в ядре тора ТВ.

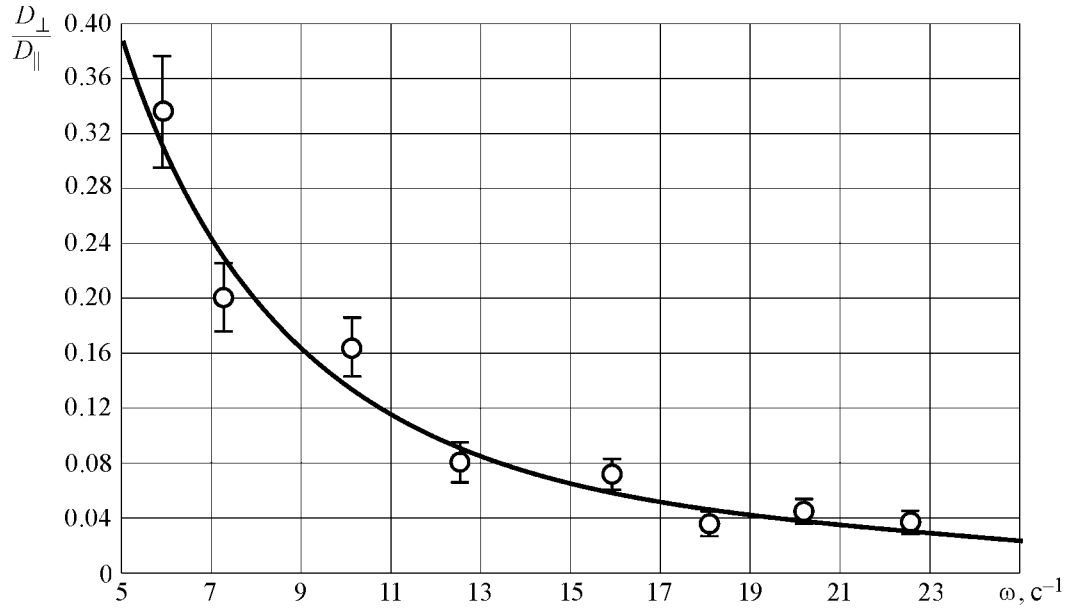


Рис. 3: Экспериментальная зависимость отношения коэффициентов диффузии D_{\perp}/D_{\parallel} частиц туши в ТВ в воде от угловой скорости вращения ω .

Таким образом, для случая нашего эксперимента коэффициент диффузии молекул этой смеси в перпендикулярном к оси вращения направлении D_{\perp} ниже более чем на порядок по сравнению с величиной D_{\parallel} .

3. Диффузия частиц туши в ТВ в воде. Такой процесс экспериментально исследован нами в работе [13], где предложен метод одновременного определения коэффициентов диффузии частиц туши в ТВ D_{\parallel} и D_{\perp} . Однако зависимость $D_{\perp}(\omega)$ определена только для одного значения угловой скорости вращения ω . В данной работе нами экспериментально исследована эта зависимость для различных значений величины ω . Описание экспериментальной установки и методики измерения приведены в [13].

ТВ в воде создавался при выталкивании порции воды из генератора вихря. Для измерения коэффициентов диффузии D_{\parallel} и D_{\perp} ТВ в воде использовалась тушь, что давало возможность визуализировать вихрь. Перед выталкиванием порции воды из генератора ТВ на внутреннюю поверхность его сопла наносилась узкая полоска туши, параллельная оси сопла, которая после выталкивания порции воды попадала в тороид вихря. В начальный момент движения ТВ тушь оказывалась сосредоточенной в короткой части тора, как показано на рис. 2 (момент t_1). При дальнейшем движении вихря изменение длины тора, заполненного частицами туши, и расширение его диаметра в

процессе диффузии этих частиц за промежуток времени Δt составляют Δl_{\parallel} и Δr_{TOR} соответственно. Поэтому коэффициенты диффузии D_{\parallel} и D_{\perp} могут быть определены из следующих формул: $\Delta l_{\parallel} = \sqrt{6D_{\parallel}\Delta t}$ и $\Delta r_{\text{TOR}} = \sqrt{6D_{\perp}\Delta t}$.

На опыте коэффициенты D_{\parallel} и D_{\perp} определялись для различных значений скорости углового вращения ω . Варьирование величины ω достигалось путём изменения начальной скорости V_{TBZ_0} поступательного движения ТВ, поскольку они связаны между собой [2, 11].

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость отношения коэффициентов диффузии частиц туши D_{\perp}/D_{\parallel} в ТВ в воде от угловой скорости вращения вещества ω в ТВ. Видно, что с ростом ω величина коэффициента D_{\perp} заметно уменьшается.

Таким образом, эффект анизотропии процесса диффузии частиц веществ в тороидальных вихрях (ТВ) наблюдается для частиц плазмы, атомов и молекул газа, аэрозольных частиц в воздухе [13], коллоидных частиц (туши) в воде.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] У. Юсупалиев, *Физика плазмы* **31**(6), 543 (2005).
- [2] У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С.А. Шутеев, *ЖТФ* **77**(7), 50 (2007).
- [3] У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев, *Физика плазмы* **33**(3), 226 (2007).
- [4] В. Ф. Тарасов, *Дис. на соиск. степени к.ф.-м.н.* (Ин-т гидродинамики СО АН СССР, Новосибирск, 1975).
- [5] K. Shariff and M. Leonard, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **24**, 235 (1992).
- [6] Д. Г. Ахметов, О. П. Кисаров, *ПМТФ* **7**(4), 120 (1966).
- [7] J. P. Sullivan, S. E. Windall, and S. Ezekiel, *AIAA J* **11**, 1384 (1973).
- [8] М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат, *Проблемы гидродинамики и их математические модели* (М., Наука, 1973).
- [9] Д. Г. Ахметов, *ПМТФ* **42**(5), 70 (2001).
- [10] Д. Г. Ахметов, *Вихревые кольца* (Новосибирск, Академ. изд-во "Гео", 2007).
- [11] У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, N 4, 39 (2006).
- [12] А. Ф. Александров, У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев, *Прикладная физика*, N 6, 154 (2006).

- [13] У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, К. З. Рухадзе, С. А. Шутеев, Краткие сообщения по физике ФИАН **34**(4), 45 (2007).
- [14] И. С. Маршак, А. С. Двойников, В. П. Кирсанов и др., *Импульсные источники света*, под ред. Маршака И.С. (М., Энергия, 1978).
- [15] Химическая энциклопедия. Т. 4 ("Большая Российская Энциклопедия", М., 1995).
- [16] Б. М. Смирнов, *Физика слабоионизованного газа* (М., Наука, 1985).
- [17] Б. М. Смирнов, *Аэрозоли в газе и плазме* (М., ИВТАН, 1990).

Поступила в редакцию 22 февраля 2012 г.