

УДК 532.52

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

П. В. Пипич

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Исследовано влияние различных способов формирования высокоскоростной кумулятивной струи на ее скорость. Результаты экспериментов позволяют оптимизировать процесс получения высокоскоростной кумулятивной струи. Получены спектры медной струи и определена ее температура. Отмечена возможность применения медной высокоскоростной кумулятивной струи для квазинепрерывной генерации лазерного излучения.

О высокоскоростных кумулятивных струях (ВКС) существует лишь несколько работ (см., например, [1–3]). ВКС представляет собой поток атомов и ионов, полученный при взрывном обжати металлического цилиндрического лайнера. Схема эксперимента для получения ВКС показана на рис. 1. Лайнер герметично соединен со стеклянной трубкой, из которой откачан воздух. От давления оставшегося воздуха зависит максимальная скорость струи. При давлении свыше 1330 Па струя не образуется. Максимальная скорость струи достигается при давлении  $10^{-4}$  Па. Такую скорость можно получить и при большем давлении, однако она будет уменьшаться по мере распространения струи по трубке. Установлено, что максимальная скорость зависит от атомной массы материала лайнера: чем меньше атомная масса, тем больше максимальная скорость струи. Наибольшая скорость для бериллия составляет 90 км/с, меди — 70 км/с, свинца — 46 км/с. Лайнер окружен зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Между детонатором и лайнером помещена вставка из инертного материала, от диаметра которой зависят фазовая скорость распространения детонационной волны вдоль лайнера и максимальная скорость ВКС. Для получения большей скорости необходимы вставка и заряд большего диаметра. Для меди максимальная скорость достигалась при диаметре заряда 20 см. Также отмечена зависимость скорости струи от диаметра и толщины стенок лайнера. Плотность материала струи около  $10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>. С помощью спектрального анализа струи, полученной при обжатии алюминиевого лайнера, определен состав струи: атомы и одно- и двухзарядные ионы алюминия.

Целью данной работы является получение дополнительных экспериментальных данных о ВКС для уточнения сферы применений, в частности данных о температуре струи, а также получение необходимых скоростей ВКС с возможно меньшими зарядами ВВ.

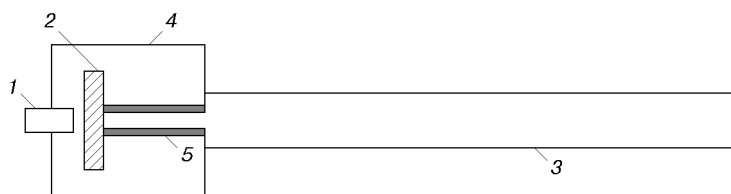


Рис. 1. Схема эксперимента для получения ВКС:

1 — детонатор, 2 — вставка из инертного материала, 3 — стеклянная трубка, 4 — взрывчатое вещество, 5 — лайнер

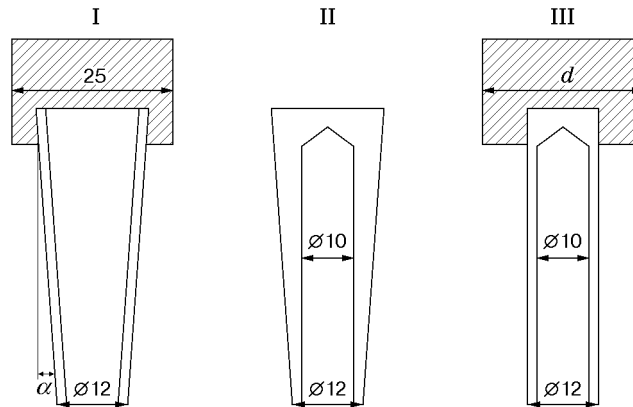


Рис. 2. Типы лайнеров, используемых в экспериментах

В данной работе в основном изучались медные лайнеры. Несколько экспериментов проведено с использованием графитовых и алюминиевых лайнеров. Схема эксперимента совпадает с принятой в [1], т. е. ВКС распространялась по трубке диаметром 37 мм, из которой был откачан воздух до давления не более 10 Па. Для определения скорости головной части струи на трубку наносились метки, расстояние между которыми составляло 10 см (в отдельных экспериментах 15 см). Ширина меток 1,5–2,0 см. В качестве ВВ применялся гексоген насыпной плотности. Фотографирование ВКС проводилось сверхскоростной фоторегистрирующей установкой (СФР), съемочная камера которой использовалась как фоторегистратор. Скорость вращения зеркала 60 000 об/мин. Съемка проводилась на цветную пленку чувствительностью 400 ед. ISO.

В [1] установлено, что скорость струи для данного материала лайнера тем больше, чем больше диаметр заряда. По-видимому, диаметр инертной вставки пропорционален диаметру заряда. Наличие инертной вставки приводит к уменьшению угла подхода детонационной волны к поверхности лайнера и увеличению фазовой скорости детонационной волны вдоль лайнера, а следовательно, и скорости движения точки на оси лайнера, в которой происходит столкновение его внутренних слоев. Эту точку будем называть точкой контакта. Ясно, что чем больше скорость точки контакта, тем больше скорость, с которой пары металла выталкиваются из лайнера. Скорость точки контакта можно увеличить несколькими способами.

1. Используется инертная вставка и лайнер I (рис. 2) с диаметром, уменьшающимся в направлении распространения детонационной волны. Участкам лайнера с большим диаметром требуется больше времени для достижения оси, чем участкам с меньшим диаметром. Однако детонационная волна приходит раньше к участкам лайнера с большим диаметром, что позволяет добиться малого различия во времени прихода к оси начального и конечного участков лайнера, т. е. получить большую скорость точки контакта.

2. Используется лайнер II (рис. 2), толщина стенок которого уменьшается в направлении распространения детонационной волны. Участки с большей толщиной стенок-metaются с меньшей скоростью, чем участки с более тонкими стенками, и более толстостенным участкам требуется больше времени для достижения оси лайнера. Детонационная волна приходит раньше к участкам лайнера с более толстыми стенками, что компенсирует меньшую скорость толстостенных участков. За счет этого, как и в первом случае, можно получить малое различие во времени прихода к оси начального и конечного участков лайнера, т. е. большую скорость точки контакта.

3. Лайнер III (рис. 2) использовался для экспериментов, в которых увеличение скорости ВКС достигалось за счет увеличения диаметра вставки из инертного материала. Этот способ увеличения скорости ВКС использовался в [1–3].

Номер эксперимента	Лайнер (рис. 2)	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$v$ , км/с
1	II	0	—	12
2	II	2	—	15
3	II	4	—	12
4	III	0	25	21
5	III	0	60	30
6	I	2	25	30
7	I	4	25	30

Представленные на рис. 2 профили лайнеров являются простейшими. Они используются для построения модели, так как точно рассчитать требуемый профиль достаточно трудно, поскольку на процесс схлопывания влияет вязкость материала лайнера, а коэффициент вязкости для условий взрыва неизвестен.

Проведен ряд экспериментов с лайнерами, показанными на рис. 2. Во всех случаях длина лайнеров составляла 50 мм. В опыте с инертной вставкой диаметром 60 мм диаметр заряда 72 мм, во всех остальных случаях — 37 мм. В таблице приведены значения скорости головной части струи ВКС  $v$  для ряда значений диаметра инертной вставки  $d$  и угла наклона образующей к оси лайнера  $\alpha$  для различных медных лайнеров.

Результаты, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что, изменяя форму лайнера, можно увеличить скорость струи, не увеличивая диаметр заряда. В экспериментах 5–7 скорость одна и та же, хотя заряды разные. На рис. 3, 4 показано, что несмотря на разные способы получения струи, характер струйного течения одинаков. Для сравнения на рис. 5 представлена регистрограмма головной части струи в эксперименте 1. Эксперименты указывают на неоднородный характер струи, причем характер неоднородности во всех случаях различен, трудно разделить струю на основную и ВКС. Струя из лайнера II с углом  $4^\circ$  по яркости была значительно слабее, чем в экспериментах 1, 2. Предварительный расчет для этого лайнера показал, что скорость точки контакта должна убывать в направлении распространения детонационной волны.

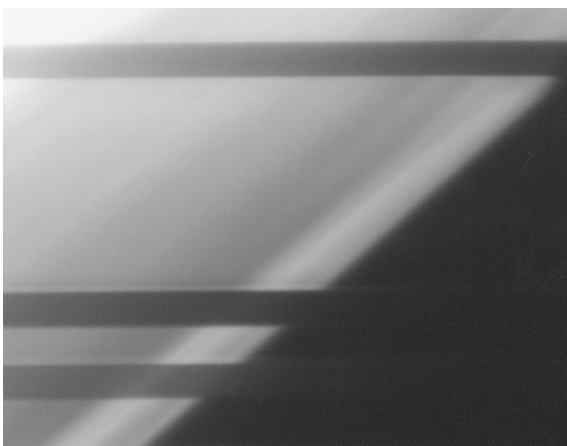


Рис. 3

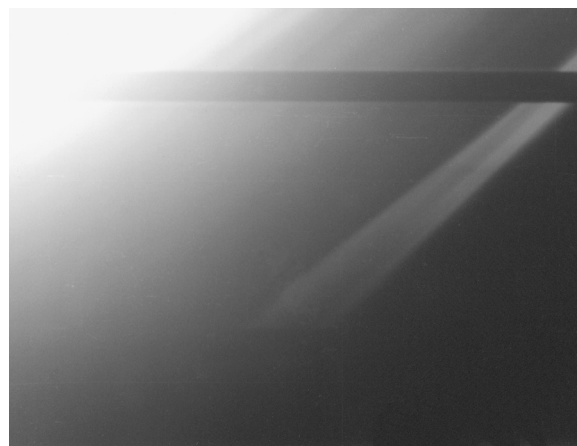


Рис. 4

Рис. 3. Регистрограмма головной части струи в эксперименте 5

Рис. 4. Регистрограмма головной части струи в эксперименте 7

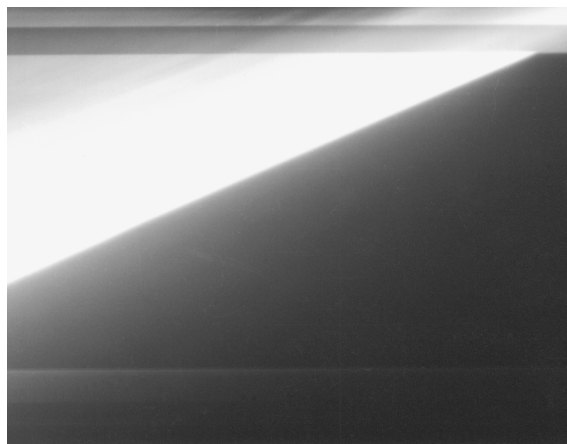


Рис. 5. Регистрограмма головной части струи в эксперименте 1

Как и в [1, 2], отмечена зависимость скорости струи от материала лайнера. В опытах с алюминиевым лайнером с теми же размерами, что и в опыте 5, получена скорость 36 км/с.

Проведены эксперименты с графитовыми лайнерами. Диаметр заряда составлял 72 мм, инертной вставки — 60 мм. Два цилиндрических лайнера имели внешний диаметр 13 и 11 мм, внутренний 8 и 6 мм и плотность 1,3 и 1,5 г/см<sup>3</sup> соответственно. Получены скорости 27,1 и 14,6 км/с соответственно. При использовании этих же лайнеров без инертной вставки с диаметром заряда ВВ 37 мм получена скорость струи 10 км/с. Плотность обычного графита равна  $1,9 \div 2,1$  г/см<sup>3</sup>. Таким образом, вследствие пористости графита проникновение продуктов взрыва ВВ в лайнер существенно влияет на процесс схлопывания и приводит к уменьшению скорости ВКС.

Проведен ряд опытов для определения температуры ВКС. В [3] приводятся лишь данные о температуре ВКС при столкновении с преградой, полученные пирометрическим методом. В отличие от [3] в данной работе для определения температуры применялся спектральный метод и проводился эксперимент по обтеканию струей тонкой проволоочки. Эксперименты по обтеканию проволоочки проводились до съёмок спектра для получения предварительного оценочного значения температуры. Температура струи определялась до столкновения с преградой. В описываемых ниже опытах исследовались струи, полученные из медного лайнера с внешним диаметром 12 мм и внутренним 10 мм без инертной вставки. Лайнеры окружены зарядом гексогена диаметром 37 мм. В газодинамическом эксперименте на пути струи на расстоянии 50 мм от лайнера помещалась тонкая стальная проволоочка. Предполагалось, что при обтекании возникнет ударная волна и на фотографии будет виден клин, образованный фронтом ударной волны. Так как скорость струи известна (12 км/с), то, измерив угол раствора клина, можно определить скорость ударной волны. Фотографирование проводилось с помощью СФР, съёмочная камера которого использовалась как “лупа времени”. Получена фотография клина с углом при вершине 16°. Таким образом, определена скорость ударной волны (1,67 км/с). Предположим, что ударная волна распространяется со скоростью звука и пары меди — идеальный газ с показателем адиабаты, равным 5/3. Отсюда получаем, что температура струи равна 12 700 К. Поскольку ударная волна распространяется со скоростью, заведомо большей скорости звука, найденное значение выше реальной температуры струи, и полученная оценка является верхней.

С помощью призменного спектрографа ИСП-51 получен спектр медной ВКС, сходный со спектром медной дуги, на который наложены сплошной спектр основной струи и продуктов взрыва, летящих вслед за ВКС. Для отделения сплошного спектра от спектра ВКС излучение, выходящее из спектрографа, регистрировалось съёмочной камерой СФР. Для

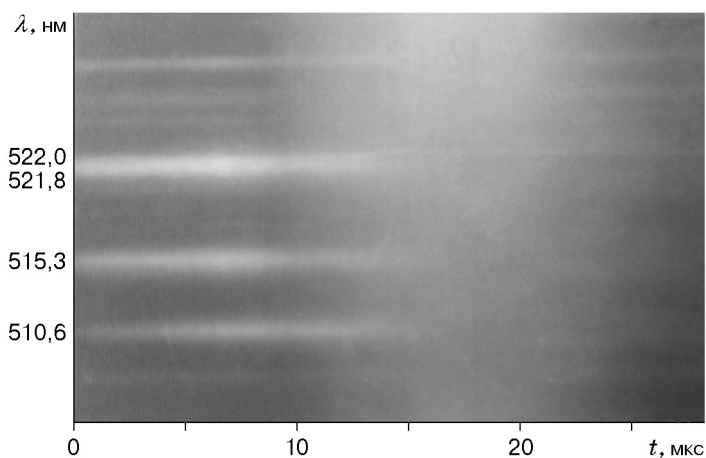


Рис. 6. Временная развертка спектра медной ВКС

получения временной развертки спектра необходимо, чтобы спектральные линии были направлены перпендикулярно оси вращения СФР. Поворот спектра на  $90^\circ$  осуществлялся с помощью призмы, расположенной между спектрографом и СФР [4]. Для получения спектра струи использовалась пленка Kodak чувствительностью 3200 ед. ISO, в ходе проявки проявителем D-76 чувствительность повышалась до 6400 ед. ISO. Температура струи определялась по данным измерения относительных интенсивностей спектральных линий. Точность метода зависит от выбора линий. В [5] предложен апробированный набор линий меди, который и использовался в данной работе. Съёмочной камерой СФР регистрировались линии с длиной волны 510,6; 515,3; 521,8; 522,0 нм. Последние две линии слились из-за недостаточной разрешающей способности спектрографа.

На рис. 6 представлена временная развертка спектра. Было проведено три эксперимента. Для разных пар линий получены различные значения температуры. Например, для линий с длиной волны 510,6 и 515,3 нм вычисленное значение температуры составляет 5500 К, для пары 510,6 и 522,0 нм температура равна 6600 К. Возможно, что различие двух значений температуры обусловлено отклонением от термодинамического равновесия в расширяющейся струе. Струя охлаждается в ходе расширения, и в процессе релаксации населенности уровней могут отклоняться от равновесных. Метод же относительных интенсивностей основан на том, что распределение атомов по энергиям бальцовское. Усреднив данные трех экспериментов, получим, что температура электронов в струе равна 6000 К.

ВКС может быть использована для квазинепрерывной генерации лазерного излучения. Большинство газовых лазеров являются импульсными, так как в результате генерации населенность нижнего рабочего уровня увеличивается и инверсия исчезает. Одним из наиболее известных и эффективных является лазер на парах меди. Нижний рабочий уровень медного лазера метастабильный, обеспечить его быстрое опустошение для поддержания непрерывной генерации до сих пор не удалось. Однако существует принципиальная возможность поддержания непрерывной генерации, связанная с быстрой сменой среды в рабочей зоне лазера с помощью газового потока. Для этого атомы, перешедшие с верхнего рабочего уровня на нижний, нужно быстро удалить из зоны генерации. Оценим скорость газового потока, необходимую для непрерывной работы медного лазера. Известно, что длительность импульса не может превышать 0,1 мкс, что объясняется временем жизни верхнего лазерного уровня. Ширина активной зоны должна быть не менее 1 мм, в более узкой зоне трудно реализовать накачку активной среды. Для того чтобы удалить газ из полоски шириной 1 мм за 100 нс, необходима скорость газового потока не менее 10 км/с.

Минимальная скорость медной ВКС 12 км/с. Таким образом, скорость ВКС достаточна для квазинепрерывной генерации. При этом отношение концентрации атомов меди на метастабильном уровне к общей концентрации атомов не должно превышать 0,06, что соответствует температуре электронов 3500 К, в противном случае метастабильный уровень заселен в такой степени, что генерация невозможна [6]. Поскольку измеренное значение температуры выше требуемого, необходимо дальнейшее охлаждение струи за счет расширения. В [6] эта проблема рассмотрена теоретически применительно к струе из плазменного ускорителя, и показано, что при начальной температуре 11 000 К при наличии буферного газа можно охладить струю до нужных параметров за счет расширения.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Можно оптимизировать процесс получения ВКС за счет рационального выбора формы лайнера. В частности, при использовании конусообразного лайнера в сочетании с инертной вставкой для получения скорости 30 км/с требуется количество ВВ, в 4 раза меньшее, чем при использовании цилиндрического лайнера.

2. Температура медной ВКС на выходе медного лайнера составляет не менее 6000 К.

Автор выражает благодарность Ю. А. Тришину за внимание к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Koski W. S., Lucy F. A., Shreffler R. G., Willig F. G. Fast jets from collapsing cylinders // J. Appl. Phys. 1952. V. 23. P. 1300–1305.
2. Новиков Н. П. О высокоскоростных кумулятивных струях // ПМТФ. 1962. № 6. С. 22–28.
3. Новиков Н. П. О некоторых свойствах высокоскоростных кумулятивных струй // ПМТФ. 1963. № 1. С. 3–13.
4. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.
5. Арбузов В. А., Захарова Е. И., Папырин А. Н. и др. Оптика и атомная физика: Лаборатор. практикум по физике. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976.
6. Бучанов В. В., Казарян М. А., Молодых Э. И., Щеглов В. А. О возможности создания непрерывного лазера на парах меди в потоке газа // Квантовая электрон. 1994. Т. 21, № 11. С. 1031–1034.

*Поступила в редакцию 4/XII 1998 г.,  
в окончательном варианте — 29/XII 1999 г.*

---