

УДК 532.525.2

ГЕНЕРАЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ ПРИ ПОДРЫВЕ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

Д. Г. Ахметов¹, М. С. Котельникова¹, В. В. Никулин¹, А. В. Пластинин¹,
Е. А. Чашников¹, В. Ф. Копьев², М. Ю. Зайцев²

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, nikulin@hydro.nsc.ru

²Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, 107005 Москва

С помощью подрыва зарядов взрывчатого вещества в цилиндрической трубе, заглушенной с одного торца, получены вихревые кольца диаметром порядка 1 м с начальной скоростью движения, превышающей 100 м/с. Такие кольца излучают отчетливо слышимый акустический сигнал, что представляет интерес для исследования генерации акустического излучения вихрями и масштабирования механизмов генерации шума. Вихревые кольца генерируются при истечении высокоскоростной газовой струи, образующейся после прохождения ударной волны по трубе. Оказалось, что измеряемые скорости вихря слабо зависят от массы взрывчатого вещества, т. е. при увеличении массы всё меньшая доля его энергии переходит в энергию вихревого кольца.

Ключевые слова: взрыв, формирование вихревого кольца.

DOI 10.15372/FGV20190403

ВВЕДЕНИЕ

Под крупномасштабными высокоскоростными вихревыми кольцами в настоящей работе понимаются вихревые кольца, которые можно получать и наблюдать только на открытом воздухе, вне стандартных лабораторных помещений. Их диаметр порядка 1 м и больше, скорость порядка 100 м/с. Получение таких колец мотивировано проблемой акустического шума, источником которого, в частности, служат различные вихревые образования [1]. Оказалось, что крупномасштабные и высокоскоростные вихревые кольца излучают отчетливо слышимый акустический сигнал, что делает их удобным для изучения объектом. Поскольку вихревое кольцо является изолированным концентрированным вихрем, не подверженным действию внешних границ, то закономерности, установленные при его исследовании, будут связаны непосредственно с вихревым характером течения и могут быть перенесены на другие более сложные вихревые образования.

Для генерации вихревого кольца с указанными параметрами требуется создание импульсной струи длительностью порядка 10 мс и энергией $10^4 \div 10^5$ Дж. Кроме того, поскольку работы могут проводиться только в полевых условиях, это накладывает дополнительные требования к способу генерации вихрей. С учетом вышесказанного в качестве источника энергии было решено использовать взрывчатое вещество (ВВ), обладающее достаточно большой удельной энергией и коротким временем ее выделения.

Возможность получения вихревого кольца с помощью подрыва ВВ в цилиндрической трубе, закрытой с одного конца, отмечена в книге [2]. Однако описание в [2] носило качественный характер и каких-либо количественных характеристик, связывающих параметры ВВ и генерируемых вихревых колец, приведено не было. Нахождение подобных связей необходимо для оптимизации процесса генерации вихрей с помощью ВВ.

В настоящей работе установлена зависимость скорости и кинетической энергии вихревого кольца от энергии ВВ, предложен механизм образования такого кольца при подрыве ВВ в цилиндрической трубе, заглушенной с одного торца.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00824).

© Ахметов Д. Г., Котельникова М. С., Никулин В. В., Пластинин А. В., Чашников Е. А., Копьев В. Ф., Зайцев М. Ю., 2019.

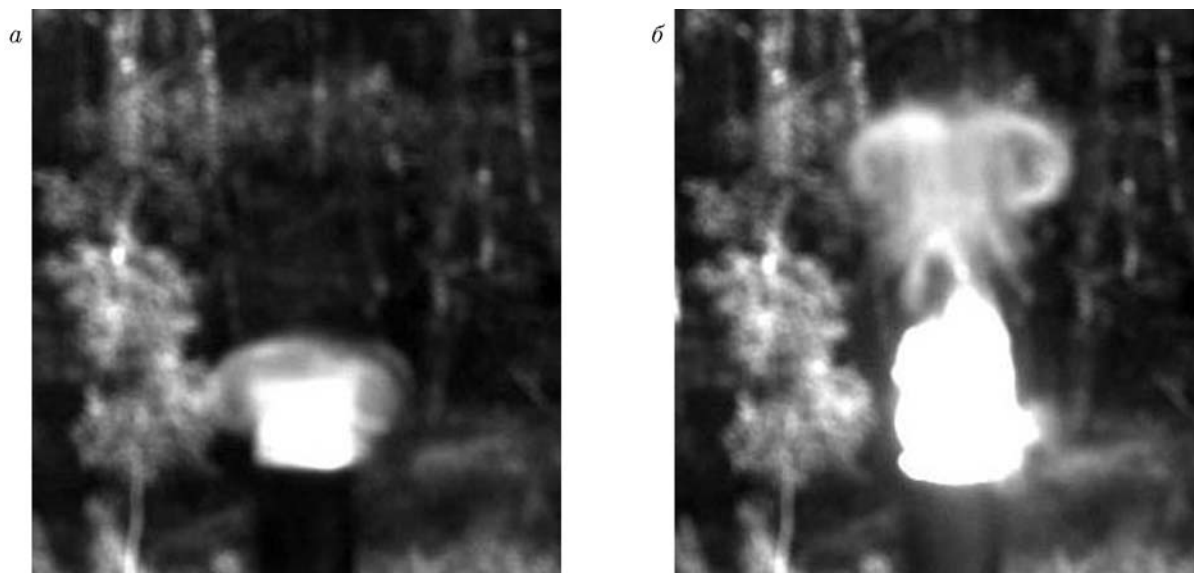


Рис. 1. Фотографии процесса образования вихревого кольца через 6 мс (а) и 20 мс (б) после подрыва ВВ массой 84 г

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрическую стальную трубу, заглушенную с одного торца. Длина трубы 3 м, диаметр — 0.8 м. В качестве ВВ используется детонационный шнур с линейной плотностью ВВ 14 г/м и скоростью детонации ВВ 7.3 км/с. Шнур располагается на расстоянии 0.2 м от заглушенного торца и представляет собой плоскую спираль, прикрепленную к специальному проволочному каркасу с помощью липкой ленты. Процесс формирования и движения вихря регистрируется скоростной видеокамерой с частотой съемки 500 кадр/с, временем выдержки 300 мкс. Камера расположена на расстоянии 40 м от трубы. Известно, что вихревое кольцо представляет собой тороидальный объем завихренной жидкости или газа (ядро вихря), вместе с которым движется некоторый объем окружающей среды [3]. По данным видеосъемки измеряется скорость передней, по ходу движения, границы движущегося вместе с вихрем объема окружающей среды после завершения формирования на расстоянии $3.5 \div 4.0$ м от среза трубы при массе ВВ 28, 35, 42 и 84 г. Граница этого объема, наряду с ядром, четко визуализируется на полученных снимках.

На рис. 1 представлены фотографии процесса образования вихревого кольца через 6 и 20 мс после подрыва ВВ. Масса ВВ 84 г. На

рис. 1,а видны истекающая из ствола струя газа, визуализированная горящими остатками оболочки детонационного шнура и липкой ленты, и формирующееся вихревое кольцо, имеющее грибообразную форму. Средняя скорость истечения струи через $4 \div 6$ мс после взрыва равна ≈ 350 м/с. За следующие 2 мс скорость падает примерно до 200 м/с. Вихревое кольцо на рис. 1 визуализировано дымом, заполнившим камеру до взрыва, горящие частицы в вихрь еще не попали.

На рис. 1,б зафиксирован момент, когда вихревое кольцо, оторвавшись от струи, движется самостоятельно, по своему закону. Скорость вихревого кольца равна $110 \div 130$ м/с.

Приведенные скорости струи и вихря оценены по видеозаписи процесса следующим образом. На протяжении одного-двух последовательных кадров измерялось перемещение передней границы струи или движущегося вместе с вихрем объема, которое делилось на соответствующий промежуток времени. В качестве пространственных масштабов использовались известные диаметр трубы и ее высота.

Момент взрыва регистрировался по вспышке, видимой через небольшое отверстие в боковой стенке трубы, сделанной на уровне детонационного шнура. Время от момента взрыва до отрыва вихревого кольца от струи составляло $10 \div 16$ мс. После отрыва вихря наблюдались одна-две пульсации газа в трубе

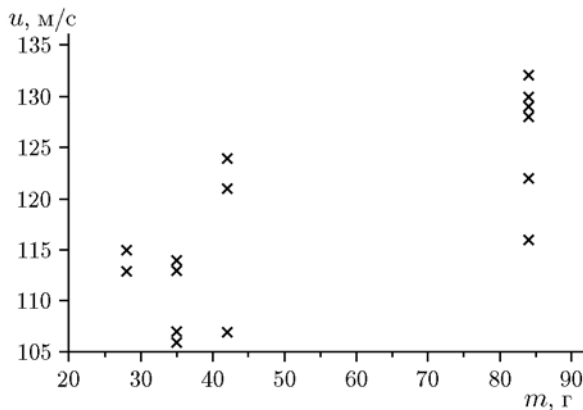


Рис. 2. Скорость вихря после завершения его формирования в зависимости от массы ВВ

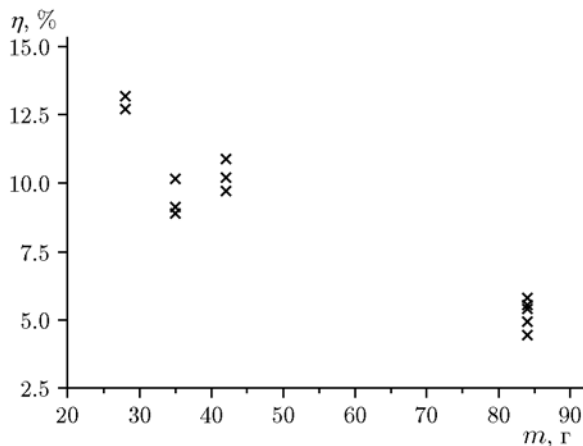


Рис. 3. КПД преобразования энергии ВВ в энергию вихревого движения в зависимости от массы ВВ

с выходом газа наружу. Период пульсаций $25 \div 30$ мс.

На рис. 2 показана зависимость скорости вихря после завершения его формирования (u) от массы ВВ (m). Видно, что зависимость $u(m)$ довольно слабая. Следовательно, выделение энергии при взрыве ВВ мало влияет на скорость.

Помимо скорости, представляет интерес КПД преобразования энергии взрыва в кинетическую энергию вихревого кольца. В качестве КПД принимается величина

$$\eta = 100K/E.$$

Здесь K — кинетическая энергия вихревого кольца, $E = mq$ — энергия, выделившаяся при взрыве, $q = 5450$ Дж/г — удельное энерговыделение. Кинетическая энергия имеет вид [4]

$$K = (1/2)\rho_a\Gamma^2R[\ln(8R/a) - 7/4],$$

где ρ_a — плотность воздуха при атмосферном давлении, Γ — циркуляция скорости, R — радиус кольца, a — радиус сечения тороидального ядра вихря. Циркуляцию скорости можно выразить через скорость вихревого кольца, используя соотношение [4] $u = [\Gamma/4\pi R]\{\ln(8/a) - 1/4\}$. Известно, что отношение R/a для вихревых колец при больших числах Рейнольдса изменяется незначительно и примерно равно 5 [3]. Положим $R/a = 5$. В итоге выражение для кинетической энергии принимает вид $K = 1.6\rho_a d^3 u^2$. Диаметр кольца $d = 2R$ во всех опытах был примерно одинаков и равнялся 0.9 ± 0.1 м. Данные для скорости вихря u брали из рис. 2. Подставляя $\rho_a = 1.3$ кг/м³, $d = 0.9$ м, находили зависимость $\eta(m)$. Данная зависимость изображена на рис. 3. Как следует из рисунка, КПД падает с ростом массы ВВ.

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

В настоящих экспериментах после взрыва образуется вытекающая из трубы струя с достаточно однородным по сечению профилем скорости, из которой формируется вихревое кольцо. Истечение струи видно на рис. 1. Механизм формирования такой струи, на наш взгляд, следующий.

После подрыва детонационного шнура от него идет ударная волна (УВ). Часть ее сразу направляется к выходному отверстию, а часть — предварительно отразившись от боковых стенок и дна камеры. Эти волны объединяются в одну волну, фронт которой становится плоским. Вслед за плоской УВ, распространяющейся вдоль оси камеры к выходному отверстию, формируется высокоскоростная струя с однородным по сечению профилем скорости. После выхода УВ из трубы происходит истечение струи до тех пор, пока не подойдет волна разгрузки от заглушенного торца камеры.

Выполним количественные оценки параметров УВ и течения газа за ней. Для начала определим количество энергии ВВ, переходящее в УВ при взрыве. Поскольку начальная энергия взрыва определяется соотношением $E = mq$, то, вычитая из нее энергию, затраченную на разлет продуктов детонации, получим

$$E_{SW} = m\left(q - \frac{\rho_a V_\infty}{(\gamma - 1)\rho_{ВВ} V_0}\right).$$

Здесь $\rho_{ВВ}$ — плотность ВВ, γ — показатель адиабаты, p_a — атмосферное давление, V_∞/V_0 — отношение конечного объема, занимаемого продуктами детонации после разлета, к начальному. По оценкам, выполненным в [5], для взрыва типичного ВВ в воздухе объем, занимаемый продуктами детонации, увеличивается примерно в 800 раз, а отношение E_{SW}/E составляет 0.97. Из этой оценки следует, что подавляющая часть энергии взрыва уходит в окружающую среду. Но, как подчеркивается в [5], в реальных ситуациях, следует оценивать энергию, перешедшую в УВ, только как 2/3 от этого значения и учитывать тот факт, что ВВ сгорает с неполным выделением энергии.

Согласно [5] волну, возникшую в результате взрыва в канале, можно считать плоской на расстояниях, превышающих $4 \div 8$ максимальных поперечных размеров канала от места взрыва, что соответствует рассматриваемой постановке. Для плоских волн в каналах постоянного сечения, по данным работы [6], избыточное давление может быть определено по следующей формуле:

$$\Delta p = \left(78.8 \frac{E_S}{r} + 3.91 \sqrt{\frac{E_S}{r}} \right) \exp \left\{ \frac{\beta r}{d} \right\} \text{ [Па]}, \quad (1)$$

где r — расстояние от места взрыва, β — коэффициент шероховатости стенок канала, $d = 1.12\sqrt{S}$ — приведенный диаметр канала, E_S — энергия взрыва на единицу площади канала. Поскольку взрыв производится на некотором удалении от заглушенного торца, в качестве S при подсчете удельной энергии следует брать удвоенную площадь сечения канала. Коэффициент шероховатости определяется высотой неровностей на стенках по отношению к радиусу канала и может быть рассчитан по формуле [5]

$$\beta = 2\alpha/\rho_a,$$

где α — коэффициент аэродинамического сопротивления канала, который в данном случае принят равным $0.1 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$, ρ_a — плотность газа при нормальных условиях [6]. С учетом отмеченных выше трудностей точного подсчета количества энергии, переходящей в УВ, при оценке избыточного давления мы ставили целью определение порядка его значения и установление его зависимости от массы используемого ВВ. В условиях данного эксперимента эту

зависимость можно считать практически линейной, поскольку второе слагаемое в (1) становится значимым только в ситуациях, когда длина канала много больше его диаметра.

После определения избыточного давления все остальные показатели можно вычислить из соотношений на фронте УВ, считая воздух политропным газом [7]. Из уравнения Гюгонио определяем плотность газа за фронтом:

$$\rho = \rho_a \frac{(\gamma - 1)p_a + (\gamma + 1)(p_a + \Delta p)}{(\gamma + 1)p_a + (\gamma - 1)(p_a + \Delta p)}.$$

Местную скорость звука, скорость фронта и скорость движения газа за фронтом находим из следующих формул [7]:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \quad D = \sqrt{c_a^2 + \frac{\gamma + 1}{2\rho_a} \Delta p},$$

$$v_0 = \frac{2D}{\gamma + 1} \left(1 - \frac{c_a^2}{D^2} \right).$$

Здесь c_a — скорость звука при нормальных условиях, принятая равной 330 м/с. Время истечения газа из трубы можно оценить, предполагая, что непосредственно за УВ по возмущенному газу движется волна разрежения. В действительности течение за УВ носит гораздо более сложный характер, но для оценок мы предполагаем, что волна разрежения существует в непосредственной близости от фронта УВ, является плоской и момент остановки истечения газа определяется временем, за которое фронт волны разрежения, соответствующий нулевой скорости газа, доберется до выходного отверстия. Это время можно найти непосредственно из выражения для скорости газа в волне разрежения, приравняв скорость к нулю, а в качестве координаты взяв координату выходного отверстия трубы:

$$t_0 = \frac{2}{\gamma - 1} \frac{x}{-l_0},$$

где $l_0 = v_0 - 2c_0/(\gamma - 1)$, c_0 — скорость звука в газе непосредственно за фронтом УВ. Тогда полное время от момента взрыва до остановки истечения составит $t = t_0 + L/D$, где L — длина трубы. Оценить массу газа, уносимого струей при истечении из трубы, можно, вычислив значение плотности газа, оставшегося в трубе на момент окончания истечения, т. е. плотности, соответствующей состоянию газа в волне

разрежения при нулевой скорости газа. Найдем ее из адиабаты Пуассона:

$$\rho_f = \rho_0(c_f/c_0)^{2/(\gamma-1)},$$

где ρ_0 — плотность газа за фронтом УВ. Скорость звука, соответствующая покоящемуся газу в волне разрежения, определяется по формуле

$$c_f = [(1 - \gamma)/2]l_0.$$

В табл. 1 приведены значения скачка давления Δp и соответствующих ему скоростей фронта D , газа v_0 и звука c_0 за фронтом УВ, в табл. 2 — плотность газа за фронтом УВ ρ_0 и в состоянии покоя ρ_f , время истечения t , скорость звука c_f , соответствующая покоящемуся газу, и отношение массы вытекающего газа M к начальной массе M_0 при разных массах ВВ. Из табл. 2, в частности, следует, что теоретический расчет времени от момента взрыва до остановки истечения неплохо согласуется со временем от момента взрыва до отрыва вихря от струи, что указывает на адекватность приведенных оценок рассматриваемому процессу.

Отметим, что вихревые кольца излучают хорошо слышимый акустический сигнал, величина которого на расстоянии 20 ÷ 30 м от установки составляет примерно 55 дБ.

Таблица 1

Скачки давления и соответствующие им скорости фронта, газа и звука за фронтом УВ

m , г	Δp , МПа	D , м/с	v_0 , м/с	c_0 , м/с
28	0.4	692	445	439
35	0.5	755	509	460
42	0.6	814	567	479
84	1.2	1102	837	582

Таблица 2

Плотность за фронтом УВ, время истечения, скорость звука и плотность, соответствующие покоящемуся газу, и доля вытекающего газа

m , г	ρ_0 , кг/м ³	t , мс	c_f , м/с	ρ_f , кг	M/M_0 , %
28	3.64	12.9	350	1.17	9.74
35	3.99	12.4	358	1.14	12.4
42	4.28	11.9	366	1.11	14.7
84	5.39	9.96	414	0.99	24.1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью подрыва ВВ в цилиндрической трубе, заглушенной с одного торца, произведена генерация высокоскоростных (со скоростью более 100 м/с) крупномасштабных (диаметром порядка 1 м) вихревых колец. Вихревое кольцо формируется в результате истечения импульсной струи воздуха, получающейся после прохождения ударной волны по трубе. Экспериментальные наблюдения времени, прошедшего от момента взрыва до отрыва вихря от струи, согласуются с суммой двух времен: времени истечения струи, рассчитанного по времени прихода заднего фронта волны разрежения от заглушенного торца трубы к ее выходу, и времени движения ударной волны по длине трубы. Оценка количества воздуха, вытекшего из трубы при формировании вихря, составляет 10 ÷ 25 % от его начального количества в трубе. КПД преобразования энергии взрыва в кинетическую энергию вихревого кольца уменьшается с увеличением массы заряда. В экспериментах максимальное значение КПД не превышает 15 %. Получаемые вихревые кольца генерируют хорошо слышимый акустический сигнал.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Копьев В. Ф., Чернышев С. А.** Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука // *Успехи физ. наук.* — 2000. — Т. 170, № 7. — С. 713–743.
2. **Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М.: Наука, 1973.
3. **Ахметов Д. Г.** Вихревые кольца. — Новосибирск: ГЕО, 2007.
4. **Ламб Г.** Гидродинамика. — М.; Л.: ОГИЗ, 1947.
5. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2004.
6. **Рябинин Ю. Н., Родионов В. Н., Вахрамеев Ю. С.** Затухание ударных волн в каналах постоянного сечения // *Механическое действие взрыва.* — М.: Изд-во ИДГ РАН, 1994.
7. **Овсянников Л. В.** Лекции по основам газовой динамики. — Москва; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2003.

*Поступила в редакцию 01.10.2018.
После доработки 23.11.2018.
Принята к публикации 20.02.2019.*