

УДК 532.529

© К. Н. Волков<sup>1\*</sup>, В. Н. Емельянов<sup>1</sup>, И. Е. Капранов<sup>2</sup>, 2024

<sup>1</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,  
190005, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>АО «ЦКБ МТ «Рубин», 191119, ул. Марата, д. 90, Санкт-Петербург

\*dsci@mail.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА С НОРМАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННОЙ ПЛОСКОЙ ПРЕГРАДОЙ

Статья поступила в редакцию 12.08.2023, после доработки 05.03.2024, принята в печать 18.03.2024

### Аннотация

Необходимость развития моделей и методов расчета нестационарных течений газа и жидкости с концентрированной завихренностью обуславливается широким распространением такого рода течений в природе и технике. Рассматривается численное моделирование формирования вихревого кольца, его распространения и взаимодействия с плоской преградой, ориентированной по нормали к направлению перемещения кольца. Обсуждается построение модели виртуального генератора вихревых колец и выбор комплекса параметров, описывающих генерирующий импульс (продолжительность импульса и его амплитуда). Расчетная область состоит из внутренней области генератора вихревых колец и область внешнего пространства за его срезом, в которой происходит формирование и движение вихревого кольца. Для численных расчетов применяются нестационарные уравнения Навье—Стокса в осесимметричной постановке, для дискретизации которых используется метод конечных объемов. Для моделирования течения, образующегося при движении поршня в трубе, на левом торце генерирующей трубки используются нестационарные граничные условия, описывающие изменение массового расхода во времени. Приводятся распределения давления по преграде и изменение продольной силы, действующей на преграду, во времени, а также изменение характеристик вихревого кольца при его взаимодействии с преградой. Результаты численных расчетов сравниваются с данными физического эксперимента. Приводится качественная картина течения, возникающего при приближении вихревого кольца к стенке, а также обсуждаются ключевые особенности потока и критические точки, которые формируются при взаимодействии вихревого кольца со стенкой.

**Ключевые слова:** вихревое кольцо, преграда, численное моделирование, давление, сила

UDC 532.529

© К. Н. Волков<sup>1\*</sup>, В. Н. Емельянов<sup>1</sup>, И. Е. Капранов<sup>2</sup>, 2024

<sup>1</sup>Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, 190005, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya Str., 1, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>JSC “CDB MT “Rubin”, 191119, Marata Str., 90, St. Petersburg, Russia

\*dsci@mail.ru

## SIMULATION OF INTERACTION OF A VORTEX RING WITH A NORMALLY LOCATED FLAT TARGET

Received 12.08.2023, Revised 05.03.2024, Accepted 18.03.2024

### Abstract

The need to develop models and methods for calculating unsteady gas and fluid flows with concentrated vorticity is determined by the wide distribution of such flows in nature and technology. Numerical simulation of the formation of a vortex ring, its propagation and interaction with a flat target oriented normal to the direction of movement of the ring is considered. The construction of a model of a virtual generator of vortex rings and the choice of a set of parameters describing the generating pulse (pulse duration and its amplitude) are discussed. The computational domain consists of the internal region of the vortex ring generator and the external space region behind its outlet, in which the formation and movement of the vortex ring occurs. For numerical

Ссылка для цитирования: Волков К.Н., Емельянов В.Н., Капранов И.Е. Моделирование взаимодействия вихревого кольца с нормально расположенной плоской преградой // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 8–22. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-1

For citation: Volkov K.N., Emelyanov V.N., Kapranov I.E. Simulation of Interaction of a Vortex Ring with a Normally Located Flat Target. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 1, 8–22. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-1

calculations, unsteady Navier–Stokes equations in an axisymmetric formulation are used, for discretization of which the finite volume method is applied. To simulate the flow generated by the movement of the piston in the tube, unsteady boundary conditions are used at the outlet of the generating tube, describing the distribution of mass flow rate over time. The distribution of pressure over the target and the change in the longitudinal force acting on the target over time, as well as the change in the characteristics of the vortex ring during its interaction with the target are given. The results of numerical calculations are compared with the data of a physical experiment. A qualitative pattern of the flow that occurs when a vortex ring approaches a wall is presented, and the key features of the flow and critical points that are formed during the interaction of the vortex ring with the wall are discussed.

**Keywords:** vortex ring, obstacle, numerical simulation, pressure, force

## 1. Введение

Вихревые кольца представляют собой устойчивые долгоживущие гидродинамические образования, которые способны двигаться в заданном направлении по прямолинейной траектории, преодолевая значительные расстояния [1, 2]. Вихревые кольца встречаются как в природных явлениях (смерчи, ураганы), так и применяются в практической деятельности человека (тушение пожаров, авиационная техника). Помимо фундаментального значения, взаимодействие вихревого кольца с твердой поверхностью представляет и самостоятельный интерес, поскольку подобное явление возникает в различных приложениях. С эволюцией вихревых течений жидкости или газа вблизи твердых поверхностей связан ряд практически важных задач. В частности, когерентные структуры в виде кольцевых вихрей образуются в импактных струях [3]. При взаимодействии движущегося кольцевого вихря с преградой на преграде возникают касательные напряжения трения, в то время как затраты энергии на образование кольцевого вихря являются незначительными.

Одна из особенностей гидродинамической структуры вихревого кольца является наличие области атмосферы, которая включает в себя вращающиеся в тороидальном вихре массы среды и пространство внутри вихревого кольца [4]. По своей форме атмосфера близка к эллипсоиду вращения до тех пор, пока кольцо сохраняет устойчивую осесимметричную структуру. Атмосфера образуется на этапе формирования вихревого кольца и состоит из среды, находящейся в устройстве генерации, а также из среды, непосредственно прилегающей к выходному отверстию генератора. Вихревое кольцо не подвержено влиянию внешних границ и допускает теоретическое описание как в стационарном, так и в колебательных режимах в рамках основных уравнений гидродинамики. Автомодельная теория описывает эволюцию средних параметров (радиуса, скорости, завихренности) в предположении, что распределение завихренности в ядре является постоянным (твердотельное вращение в ядре) или имеющим специальную форму [1, 2].

При малых числах Рейнольдса образуется вихрь с характерной спиральной структурой. При числах Рейнольдса, превышающих критическое значение, течение становится турбулентным. При этом течение разделяется на ламинарное ядро, в котором сосредоточена завихренность, и область атмосферы, где частицы жидкости совершают хаотическое движение. Критическое число Рейнольдса, построенное по начальному радиусу и скорости вихревого кольца, составляет около  $10^3$  [5, 6]. Исследования нестационарных процессов, протекающих в вихревом кольце, связаны с моделированием крупномасштабной динамики и различных типов неустойчивости [7, 8].

Во многих случаях гидродинамика взаимодействия вихрей с поверхностью изучается на примере изолированных вихрей [9]. В рамках модели идеальной жидкости влияние поверхности на поле скорости учитывается при помощи введения зеркально-отраженного воображаемого вихревого кольца с противоположной интенсивностью. Предположение о равномерном распределении завихренности внутри вихревого ядра и потенциальном течении вне ядра позволяет использовать теоретические подходы для нахождения поля скорости и потенциала, индуцированного вихревым кольцом, а также распределения давления на плоской поверхности [10, 11].

Начиная с некоторого расстояния, движение вихря отклоняется от закономерности, полученной по модели идеальной жидкости [9]. При взаимодействии вихревого кольца со стенкой необходимо учитывать формирование пограничного слоя, его нестационарный отрыв и генерацию вторичных вихрей, направление циркуляции в которых является противоположным направлению в основном вихре [12, 13]. Отрыв пограничного слоя от твердой поверхности, возникающий вследствие сильного неблагоприятного градиента давления, является существенно нестационарным из-за изменения положения вихрей со временем, что вызывает флуктуации давления на стенке [14, 15]. Вторичные вихри являются более неустойчивыми образованиями по сравнению с основным вихрем [16].

Экспериментальные исследования взаимодействия вихревого кольца с нормально расположенной твердой поверхностью показывают, что отношение диаметров вихревого кольца до и после взаимодействия

с поверхностью практически не зависит от скорости и числа Рейнольдса [17–19]. Вихревая структура течения, возникающего при взаимодействии вихревого кольца с поверхностью, обсуждается в работах [20, 21] как на основе экспериментальных данных, так и результатов моделирования крупных вихрей. Взаимодействие одиночного вихревого кольца и пары вихревых колец с нормальной и наклонной плоской преградой рассматриваются в работе [22]. Исследование поверхностной силы, вызванной столкновением вихревого кольца со стенкой, проводится в работе [23]. Численное моделирование и измерения пристеночного давления показывают, что вклады сил, возникающих при приближении первичного вихря и формировании пристенного течения, являются противоположными по знаку. Результирующая сила оказывается на два порядка меньше, чем эти две силы. Несмотря на то, что результирующая сила, вызванная воздействием вихревого кольца о стенку, достаточно мала, ее вклад, тем не менее, достаточно велик, чтобы вызвать деформацию поверхности стенки. Ядро вихря вблизи стенки создает отрицательное давление, а область с высокой скоростью деформации создает положительное давление, что приводит к значительным флуктуациям пристеночного давления [24].

В данной работе проводится численное моделирование формирования и распространения вихревого кольца, а также его взаимодействия с нормально расположенной плоской преградой. Для формирования вихревого кольца используются различные вихревые генераторы. На основе результатов расчетов построены распределения давления по поверхности преграды, а также получено распределение силы, действующей на преграду, во времени.

## 2. Формирование вихревого кольца

Генератор вихревых колец представляет собой полый цилиндр. Внутри цилиндра свободно движется поршень с последующей внезапной остановкой, импульсно выталкивающий порцию газа через выходное отверстие. Далее происходит отрыв образовавшейся вихревой структуры и ее перемещение в пространстве вдоль оси, совпадающей с осью поршня. Такие генераторы позволяют получать достаточно интенсивные вихревые кольца с начальной скоростью более 30 м/с и тонким ядром, обладая сравнительно низким уровнем собственного структурного шума. Кроме этого, поршневые генераторы вихревых колец обеспечивают хорошую повторяемость параметров вихря от запуска к запуску.

Для формирования вихревого кольца используется два варианта оформления устройства генерации. В одном из них применяется стенка с отверстием (рис. 1, а). В другом устройстве для получения вихревого кольца используется генератор в виде цилиндрической трубки с открытым концом (рис. 1, б). Внутренний диаметр трубки составляет 0,1 м. Рабочая среда — воздух при нормальных условиях (плотность  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ Па с}$ ).

Геометрическая модель представляет собой внутреннюю область генератора и область внешнего пространства за срезом сопла, в которой происходит формирование и движение вихревого кольца. Форма расчетной области и ее геометрические размеры приводятся на рис. 2. Линейные размеры нормируются на диаметр генерирующей трубки, который полагается равным  $D = 10 \text{ см}$ . Толщина преграды составляет  $0,15D$ , а толщина стенок модели —  $0,05D$ .

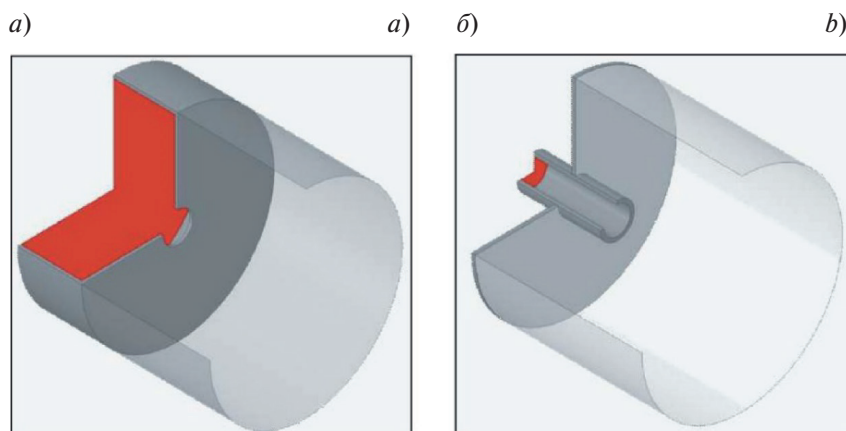


Рис. 1. Генераторы вихревых колец в виде стенки с отверстием (а) и цилиндрической трубки (б)

Fig. 1. Vortex ring generators in the form of a wall with a hole (a) and a cylindrical tube (b)

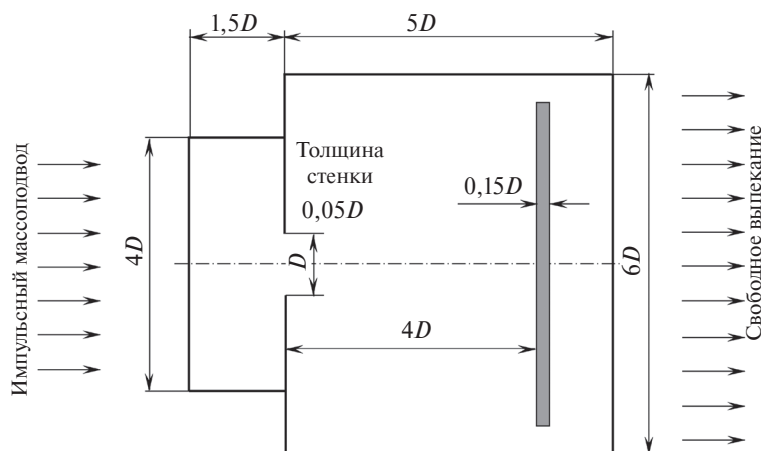


Рис. 2. Геометрия расчетной области

Fig. 2. Geometry of the computational domain

Генерация вихревого кольца осуществляется в результате импульсного истечения струи. Поршень мгновенно разгоняется до постоянной скорости и мгновенно останавливается. Характерным параметром, влияющим на формирование вихревого кольца, является отношение  $L/D$ , где  $L$  — расстояние, проходимое поршнем,  $D$  — диаметр отверстия. При  $L/D > 4$  образуется вихревое кольцо и концевая струя с вторичными вихрями, а при  $L/D < 4$  — одиночное вихревое кольцо.

В качестве безразмерного комплекса, позволяющего объединить режимные и геометрические параметры, влияющие на генерацию кольца, используется безразмерная длина струи  $L_* = VT/R$ , где  $V$  — характерная скорость истечения струи,  $T$  — время истечения струи,  $R$  — радиус выходного сечения генерирующей трубки. Слой среды, приходящий в движение в результате генерирующего импульса, имеет протяженность  $VT$ .

Для используемого в работе вихревого генератора  $R = 0,05$  м. Генерирующий импульс реализуется через задание на входной границе (сечение трубки, противоположное выходному) скорости  $V$ , которая остается постоянной от нулевого момента времени до времени  $T$ . Далее скорость потока на входе обнуляется.

Границы расчетной области удалены от оси симметрии на расстоянии, превышающее  $3D$ . В этом случае влияние границ на формирование и распространение вихревого кольца является пренебрежимо малым [16]. Расстояние от выходного сечения генерирующего отверстия до преграды выбирается таким образом, чтобы обеспечивать возможность образования вихря, его разгон, переход к фазе квазиустановившегося движения и прохождение некоторого расстояния перед ударом о преграду. Квазиустановившееся движение вихревого кольца характеризуется практически не изменяющейся во времени скоростью его перемещения.

### 3. Математическая модель

Для описания формирования вихревого кольца и течения, индуцированного его движением, используются нестационарные уравнения для вязкой несжимаемой жидкости, записанные в осесимметричной постановке. В цилиндрической системе координат основные уравнения имеют следующий вид:

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial r v_x}{\partial x} + \frac{\partial r v_r}{\partial r} = 0;$$

- уравнение изменения количества движения в осевом направлении

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right];$$

- уравнение изменения количества движения в радиальном направлении

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial r v_r}{\partial r} \right) \right].$$

Здесь  $t$  — время,  $x$  и  $r$  — осевая и радиальная координаты,  $\rho$  — плотность,  $p$  — давление,  $v_x$  и  $v_r$  — осевая и радиальная компоненты скорости,  $\nu$  — кинематическая вязкость. В качестве рабочей среды используется воздух.

Для моделирования течения, образующегося при движении поршня в трубе, на левом торце генерирующей трубки используются нестационарные граничные условия. При задании условия учитываются результаты исследований при создании реальных устройств генерации вихревых колец. На левой границе задается распределение массового расхода, зависящего от времени [25]. В качестве выходного граничного условия задается статическое давление. На поверхности преграды, а также на наружной и внутренней стенках трубы используются граничные условия прилипания для скорости ( $v_x = v_r = 0$ ). На оси ставятся условия симметрии течения ( $\partial v_x / \partial r = v_r = 0$  при  $r = 0$ ).

Слишком короткий и малоинтенсивный импульс для рассматриваемой геометрической конфигурации и свойств среды приводит к формированию вихря с низкими скоростями из-за недостаточного периода набора кинетической энергии вращательного движения вихрем. Такой вихрь имеет меньшую несущую способность и быстро диссипирует в окружающем пространстве. Напротив, продолжительный и слишком интенсивный импульс приводит к растягиванию образующегося вихревого кольца, что снижает его энергетический потенциал. Излишне затянутый генерирующий импульс также сильно возмущает среду, располагающуюся на пути кольца, что плохо сказывается на его дальнейшем распространении.

#### 4. Численный метод

Расчеты проводятся на основе вычислительного алгоритма, особенности реализации которого приводятся в работах [25, 26]. В отличие от методов моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости, основанных на методе для поправки давления или методе псевдосжимаемости, решаются полные уравнения Навье—Стокса для сжимаемой среды.

Дискретизация основных уравнений осуществляется при помощи метода конечных объемов. Для дискретизации конвективных и диффузионных потоков используются противопоточные разностные схемы 3-го порядка точности (схема MUSCL, Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws) и центрированные разностные схемы 2-го порядка точности с расщеплением вектора потока по методу Рунге, а для дискретизации по времени — неявная схема 2-го порядка точности. Для обеспечения устойчивости вычислений при моделировании низкоскоростных течений на основе модели сжимаемой среды используется метод блочного преобусловливания Якоби [26]. Система разностных уравнений решается многосеточным методом на основе V-цикла, а последовательность сеток различной разрешающей способности строится на основе метода схлопывающих граней (Edge Collapsing Method) [26].

В сечении расчетная сетка содержит около 100 тысяч ячеек. Проводится сгущение узлов сетки вблизи кромки выходного отверстия генерирующей камеры. Шаг по времени составляет 0,01 с. Расчеты проводятся на интервале времени порядка 10–15 с.

Для визуализации распространения вихревого кольца задается среда, состоящая из двух компонентов, оба из которых представляют собой воздух. Преобладающим выбирается компонент (индекс 2), который значительно превышает остальные по доле от общей массы среды, наполняющей расчетную область. Переносимая примесь выбирается как второстепенный компонент (индекс 1), поскольку ее доля от всей массы среды значительно меньше доли компоненты, в которой происходит перемещение вихревого кольца.

В начальный момент времени задаются распределения компонентов среды. В области генерирующей трубки пространство заполняется воздухом с индексом 1, а остальная часть расчетной области заполняется воздухом с индексом 2. Положение границы раздела определяется неявным образом с помощью функции-идентификатора среды, описываемой уравнением переноса. В качестве функции-идентификатора выступает объемная доля среды. При этом в областях, занятых разными средами, функция-идентификатор имеет постоянные различающиеся значения.

В начальный момент времени функция-идентификатор имеет ступенчатый профиль на границе контакта. В ходе расчетов вследствие численной диффузии этот профиль постепенно размывается, и точное положение контактной границы становится неопределенным и находится из соответствующего уравнения переноса. В случае необходимости (например, для визуализации) граница контакта определяется либо как область больших градиентов функции-идентификатора, либо как изоповерхность ее среднего значения.

#### 5. Распространение вихревого кольца

Вихревое кольцо представляет собой тороидальный объем завихренной жидкости, который движется в окружающей среде перпендикулярно плоскости кольца. Движение жидкости является осесимметричным, а вектор завихренности (ротор скорости) в торе направлен вдоль окружностей, соосных круговой оси

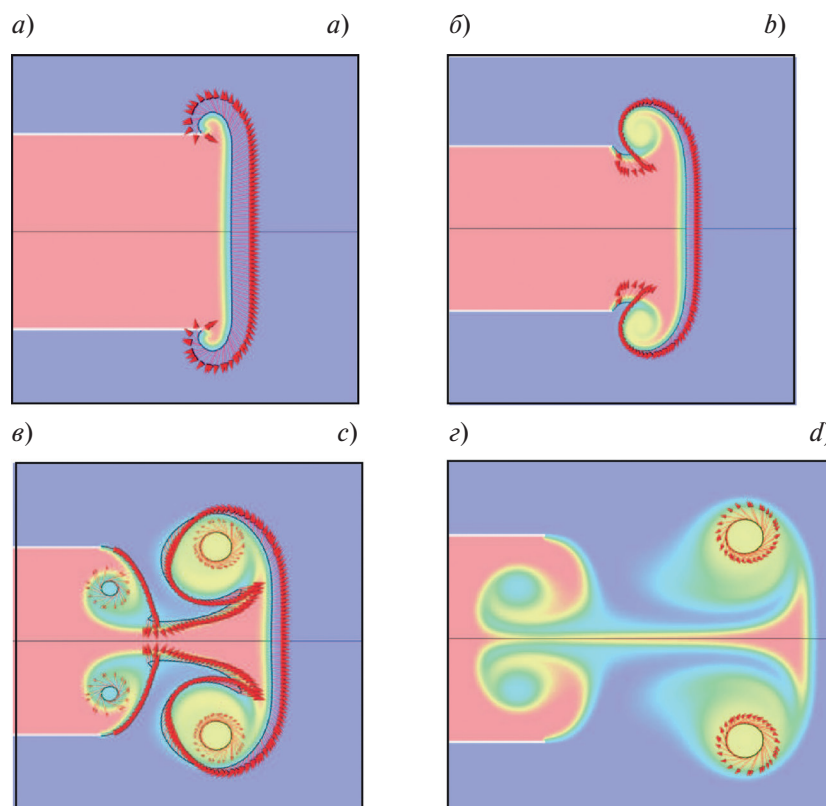


тора. Поперечное сечение тонких вихревых колец по форме близко к кругу. Вместе с тороидальным вихревым кольцом движется некоторый объем жидкости, охватывающий кольцо и имеющий форму, близкую к форме сплюснутого в направлении движения кольца эллипсоида вращения.

В число параметров вихревого кольца, представляющих практический интерес, входят его геометрические и кинематические характеристики такие, как диаметр кольцевой оси вихря и скорость его перемещения [25, 26]. В качестве параметра, позволяющего оценить интенсивность вихревого движения, выступает степень понижения давления в ядре вихревой структуры. Точка минимума давления позволяет построить динамический маркер, перемещение которого дает изменение во времени продольной координаты вихря. Дифференцирование продольной координаты по времени позволяет получить скорость перемещения вихревого кольца. Определение начальных параметров вихревого кольца производится при удалении вихря на несколько калибров от среза генерирующей трубки, поскольку установление автомодельного распределения завихренности в вихре требует некоторого времени.

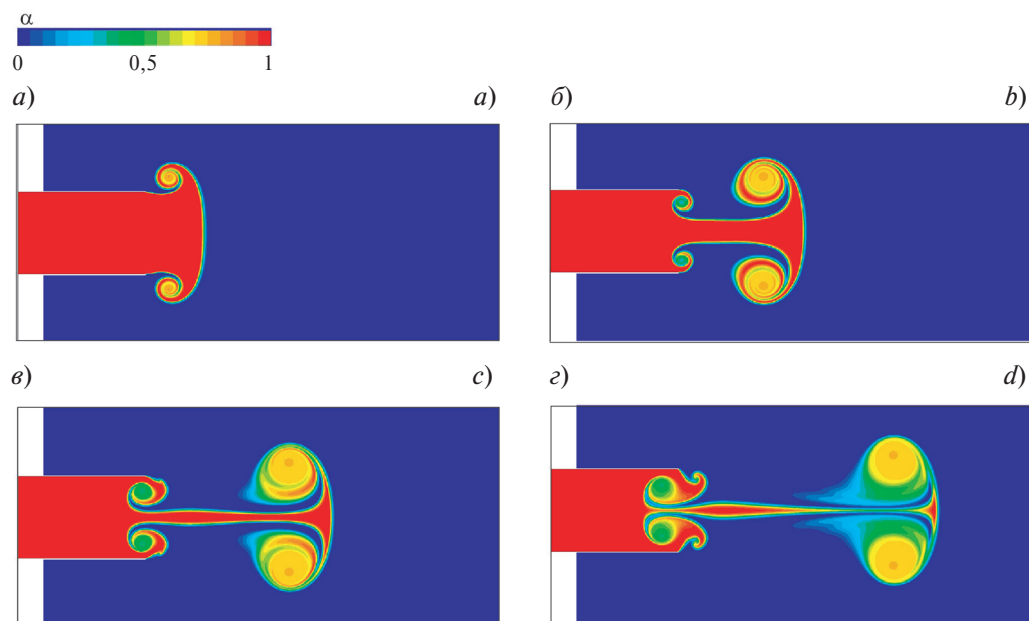
Радиус вихревого кольца определяется положением максимума завихренности в ядре. Для оценки размеров ядра вихревого кольца исследуется профиль модуля скорости вдоль линии, проходящей через центр вихревого ядра и параллельной оси движения кольца. Диаметр ядра определяется по положению максимальных значений в распределении модулей скорости внутри вихревого кольца. В соответствии с представлениями автомодельной теории, относительный размер вихря остается постоянным при движении вихря по траектории. С уменьшением размера генерирующей трубки происходит увеличение относительного размера, что связывается с увеличением длины выдуваемой струи, образующей основное вихревое кольцо и вторичные вихри, и, следовательно, с увеличением относительного размера ядра основного вихря при достаточно близких условиях запуска.

Различные этапы формирования вихревого кольца показывает рис. 3. С течением времени происходит изменение направления движения струи при выходе из генератора, захват вихревым кольцом окружающей среды, формирование области влияния вихревого кольца, свободное распространение вихревого кольца.



**Рис. 3.** Этапы формирования вихревого кольца: изменение направления движения струи при выходе из генератора (а), захват вихревым кольцом окружающей среды (б), формирование области влияния вихревого кольца (в), заключительная фаза формирования вихревого кольца (г)

**Fig. 3.** Stages of formation of the vortex ring: change in the direction of the jet at the exit from the generator (a), capture of the environment by the vortex ring (b), formation of the region of influence of the vortex ring (c), final phase of the formation of the vortex ring (d)



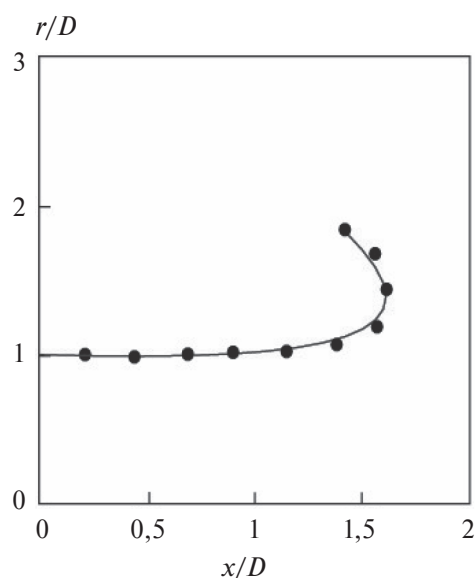
**Рис. 4.** Визуализация вихревого кольца в моменты времени 1 (а), 3 (б), 5 (в), 7 (г)

**Fig. 4.** Visualization of the vortex ring at times 1 (a), 3 (b), 5 (c), 7 (d)

Структуру вихревого кольца в различные моменты времени показывает рис. 4. Для визуализации структуры вихревого кольца используется объемная доля воздуха. Значение  $\alpha = 0$  соответствует воздуху внутри генерирующей трубки, а значение  $\alpha = 1$  — воздуху, в котором происходит движение вихревого кольца. Промежуточные значения объемной доли воздуха позволяют проследить процесс смешения.

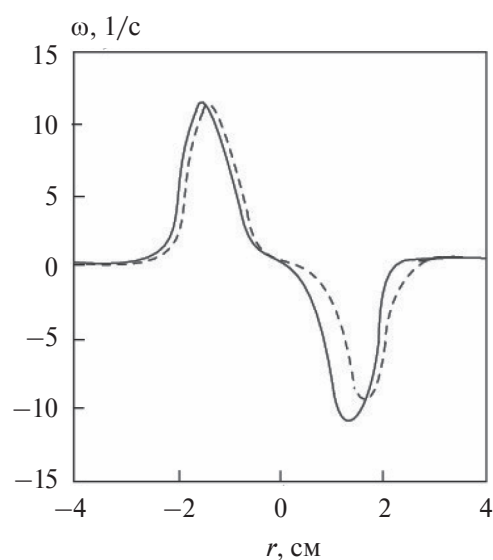
Траекторию ядра вихревого кольца показывает рис. 5 в сравнении с данными физического эксперимента [23], соответствующими числу Рейнольдса  $Re = 1000$ .

Сравнение расчетного профиля завихренности с данными измерений, соответствующими числу Рейнольдса  $Re = 1400$ , показывает рис. 6. В то время как расчетный профиль завихренности является симме-



**Рис. 5.** Траектория ядра вихревого кольца (сплошная линия) в сравнении с данными измерений [23] (черные кружки)

**Fig. 5.** Trajectory of the core of the vortex ring (solid line) in comparison with the measurement data [23] (black circles)



**Рис. 6.** Профиль завихренности в момент времени  $t = 1,67$  с (сплошная линия) в сравнении с данными измерений [27] (пунктирная линия)

**Fig. 6.** Vorticity profile at time  $t = 1.67$  s (solid line) in comparison with measurement data [27] (dashed line)

тричным, экспериментальный профиль отклоняется от симметричного, что, по всей видимости, связано с несовершенством техники измерений. На распределении осевой компоненты скорости точка пересечения кривой с прямой  $v_x = V$  соответствует центру ядра вихря и определяет радиус вихря  $R$ . В ядре вихря осевая скорость изменяется практически по линейной зависимости. Расстояние между максимумом и минимумом на концах линейного участка кривой  $v_x(r)$  равняется удвоенному радиусу ядра вихря. Более точно радиус ядра определяется по распределению радиальной скорости при  $r = R$ , поскольку наибольший и наименьший пики на таком графике выражены более четко.

Для изучения внутренней структуры вихревого кольца вдоль образующих цилиндрических сечений в расчетной области и сравнения распределений осевой и радиальной скорости с данными физического эксперимента используется ряд контрольных сечений, параллельных оси симметрии. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученных при изучении дымовых вихревых колец методом термоанемометрии, приводятся в работе [27]. Изменение кинематических параметров вихревого кольца во времени показывает рис. 7. Положение центра вихря соответствует минимуму давления.

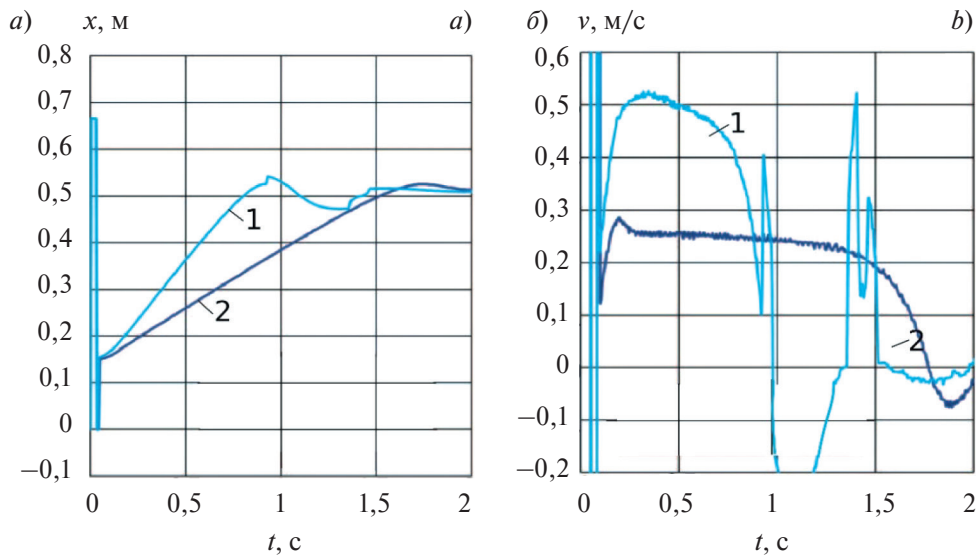


Рис. 7. Изменение положения центра вихря (а) и его скорости (б) во времени при использовании в качестве генератора вихревого кольца стенки с отверстием (линия 1) и цилиндрической трубки (линия 2)

Fig. 7. Change in the position of the center of the vortex (a) and its velocity (b) in time when using a wall with a hole (line 1) and a cylindrical tube (line 2) as a generator of the vortex ring

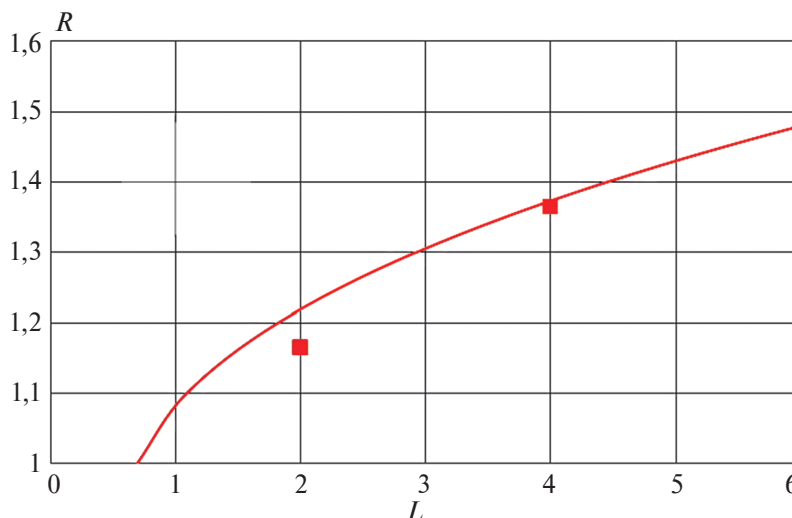
Диаметр вихревого кольца достаточно хорошо описывается корреляционным соотношением, предложенным в работе [6], а его скорость — соотношением из работы [1]. В результате проведенных расчетов получены значения радиуса кольцевой оси вихревого кольца в зависимости от длины генерирующей струи. Эти значения в безразмерном виде представлены на рис. 8. Радиус кольцевой оси при обезразмеривании относится к радиусу генерирующей трубки  $R$ . Наряду с расчетными значениями, на рис. 8 представлена теоретическая кривая, соотношение для которой имеет вид [4]

$$R^3 - \left(1 - \frac{\gamma}{2k}\right) R^2 - \alpha R - \frac{1 - \alpha/2}{2k} L + \alpha = 0,$$

где  $\alpha = 0.91$ ,  $\gamma = 0.385$ ,  $k = 2$  — эмпирические коэффициенты, полученные по результатам обработки экспериментальных данных [4]. Значения безразмерных радиусов вихревого кольца, полученные расчетным путем, удовлетворительно совпадают с теоретической кривой. С увеличением длины генерирующей струи нелинейно возрастает радиус вихревого кольца.

Слой смешения, выходящий из точки отрыва, представляет собой диффундирующую вихревую плену, спиральное ядро которой образует концентрированный вихрь. Этот концентрированный вихрь с отрицательной циркуляцией поддерживает существование рециркуляционной области в течение длительного времени. Распределение завихренности внутри рециркуляционной области является неоднородным, что объясняется





**Рис. 8.** Безразмерный радиус вихревого кольца в зависимости от безразмерной длины генерирующей струи (квадраты) в сравнении с данным автомодельной теории (сплошная линия)

**Fig. 8.** Dimensionless radius of the vortex ring depending on the dimensionless length of the generating jet (squares) in comparison with the data of the self-similar theory (solid line)

нестационарностью течения. Тонкая область на дне рециркуляционной зоны, примыкающая к твердой поверхности, подчиняется уравнениям пограничного слоя. Приближение потока к критической точке происходит, как и с противоположной стороны, под действием неблагоприятного градиента давления, что приводит к отрыву пограничного слоя и сходу во внешний поток завихренности положительного знака.

## 6. Силовое воздействие на преграду

Взаимодействие с поверхностью играет существенную роль в процессе уменьшения циркуляции вихрей со временем. Основным механизмом диссипации завихренности является взаимодействие вихрей.

По мере приближения вихревого кольца к стенке индуцируется пристенный пограничный слой из-за условия прилипания стенки, и одновременно увеличивается диаметр первичного вихревого кольца. Растекание первичного вихревого кольца вызывает радиальное течение вблизи стенки. Радиальная скорость потока увеличивается от оси симметрии первичного вихревого кольца, достигает максимума в месте расположения ядра первичного вихря, а затем уменьшается до нуля. Следовательно, соответствующее пристеночное давление сначала уменьшается от оси симметрии первичного вихревого кольца, достигает минимума в ядре первичного вихря, а затем увеличивается в радиальном направлении. Существует неблагоприятный градиент давления вдоль растекания первичного вихря.

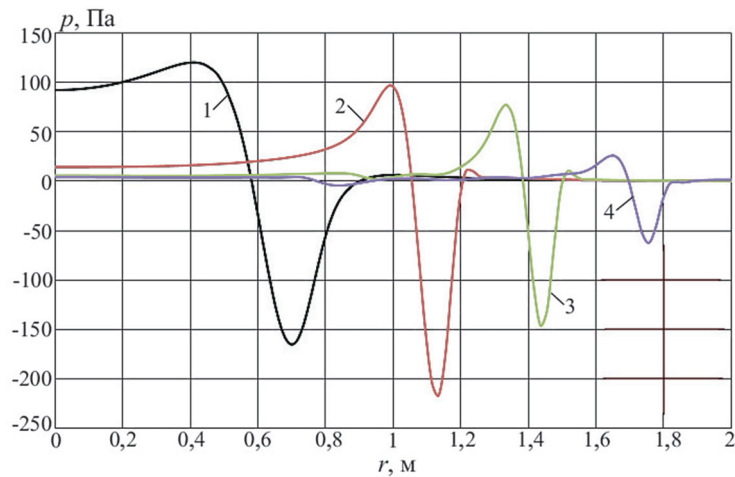
Одной из причин изменения характера массопереноса после взаимодействия вихревого кольца с препятствием является перестройка течения в его атмосфере и вокруг ядра. В пограничном слое при обтекании препятствия вихревым кольцом происходит образование завихренности противоположного знака по отношению к завихренности самого ядра. Взаимодействие завихренности, генерируемой препятствием, с вихревым кольцом приводит к срыву и уносу части завихренности из атмосферы и пограничного слоя ядра в гидродинамический след.

Взаимодействие вихревого кольца с преградой приводит к развитию ряда гидродинамических процессов. В момент контакта кольца с преградой происходит сжатие атмосферы вихревого кольца (того объема среды, который движется вместе с кольцом). При этом кольцевая ось вихря увеличивается в диаметре, а размер ядра уменьшается. Центральная часть атмосферы, где локализуются наибольшие скорости при свободном движении кольца, устремляется на периферию и начинает вращаться вместе с ядром вихря. Прохождение этого объема среды вблизи преграды сопровождается локальным подъемом давления.

В результате численных расчетов получены локальные распределения гидродинамических характеристик, обработанные в виде распределений давления вдоль поверхности преграды для нескольких характер-

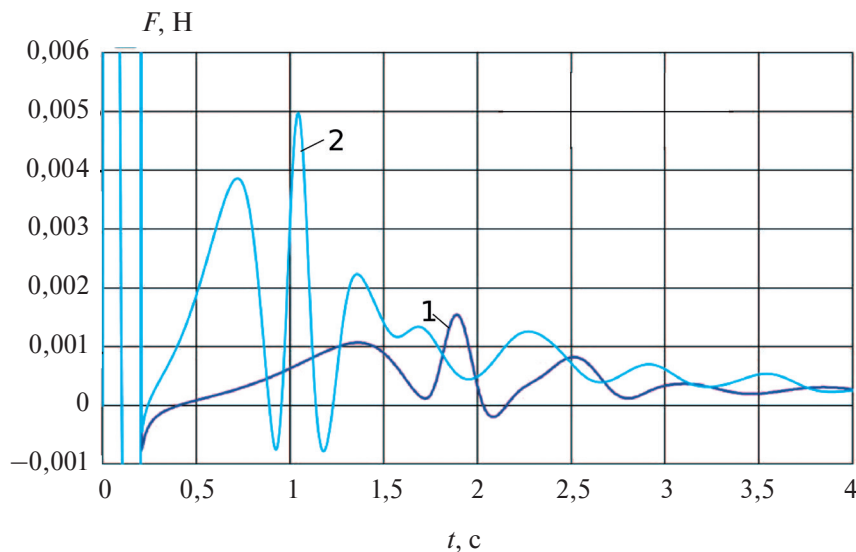
ных моментов времени (рис. 9). При использовании в качестве генератора стенки с отверстием максимум давления на преграде почти в 3 раза превосходит максимальное давление, соответствующее генератору в виде цилиндрической трубки.

Интегрирование распределений давления и сдвиговых напряжений по поверхности преграды позволяет получить силу, действующую на преграду (рис. 10). Силовое воздействие вихревого кольца на преграду в начальной фазе проявляется в виде двух пиков давления, второй из которых является более интенсивным. Дальнейшее воздействие вихревого кольца на преграду характеризуется серией пиков меньшей интенсивности с монотонным затуханием амплитуды.



**Рис. 9.** Радиальные распределения давления по поверхности преграды при взаимодействии вихревого кольца с преградой в моменты времени 17 с (линия 1), 19 с (линия 2), 21 с (линия 3), 24 с (линия 4)

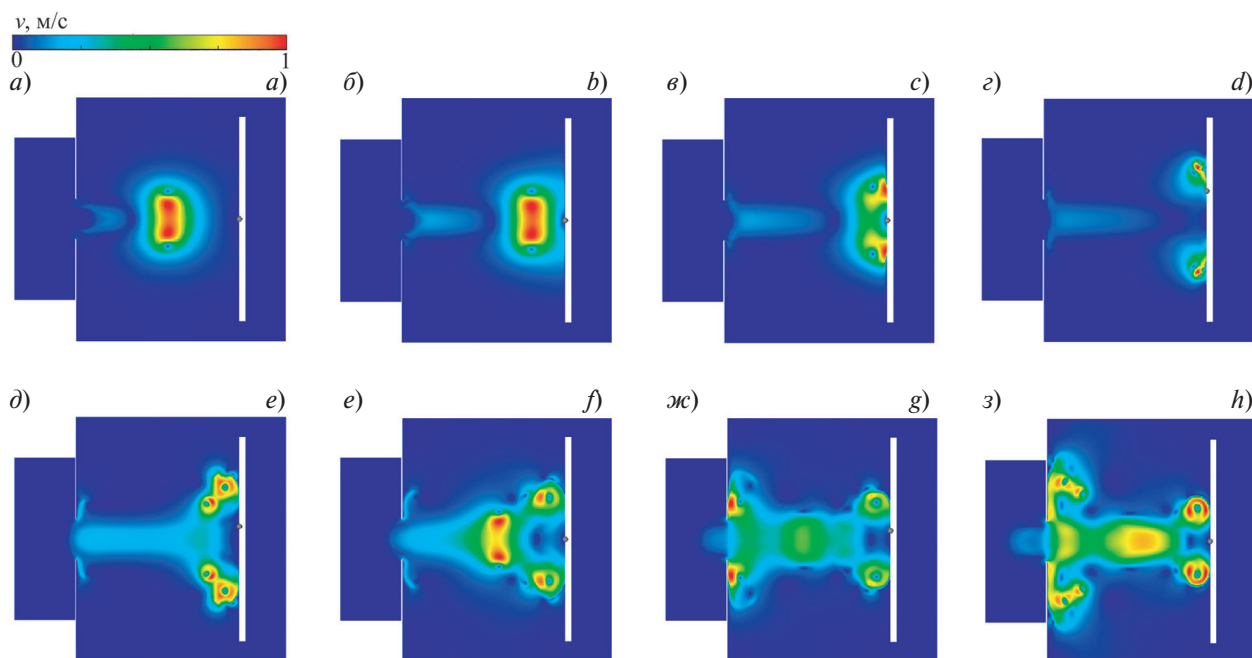
**Fig. 9.** Radial pressure distributions over the barrier surface during the interaction of the vortex ring with the barrier at the time instants 17 s (line 1), 19 s (line 2), 21 s (line 3), 24 s (line 4)



**Рис. 10.** Изменение продольной силы, действующей на преграду, во времени при использовании в качестве генератора вихревого кольца стенки с отверстием (линия 1) и цилиндрической трубки (линия 2)

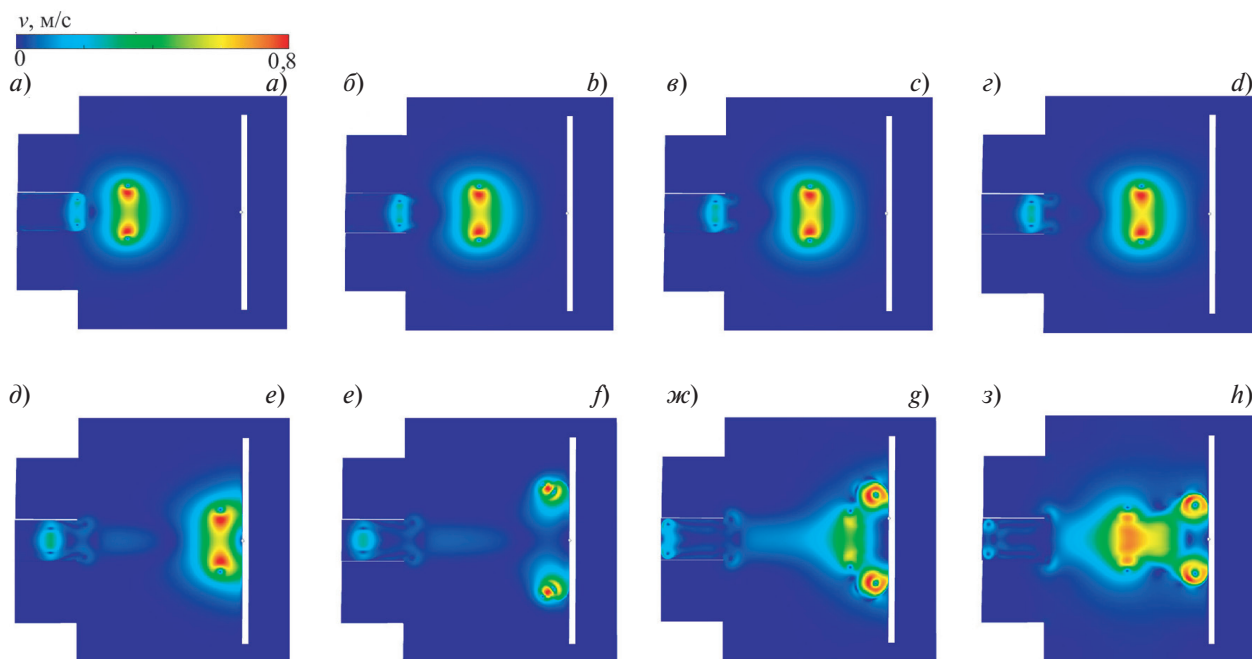
**Fig. 10.** Variation of the longitudinal force acting on the barrier over time when using a wall with a hole (line 1) and a cylindrical tube as a vortex ring generator

Структуру вихревого кольца при его взаимодействии с плоской преградой показывает рис. 11 и рис. 12 для двух различных методов генерации вихревого кольца. После взаимодействия с преградой вихревое кольцо разрушается, что приводит к формированию ряда вторичных вихрей различного размера и интенсивности.



**Рис. 11.** Скорость вихревого кольца в моменты времени 0,5 (а), 0,8 (б), 0,9 (в), 1 (г), 1,5 (д), 2 (е), 3 (ж), 4 (з) в случае формирования вихревого кольца при помощи стенки с отверстием

**Fig. 11.** Velocity of the vortex ring at times 0.5 (a), 0.8 (b), 0.9 (c), 1 (d), 1.5 (e), 2 (f), 3 (g), 4 (h) in the case of formation vortex ring using a wall with a hole



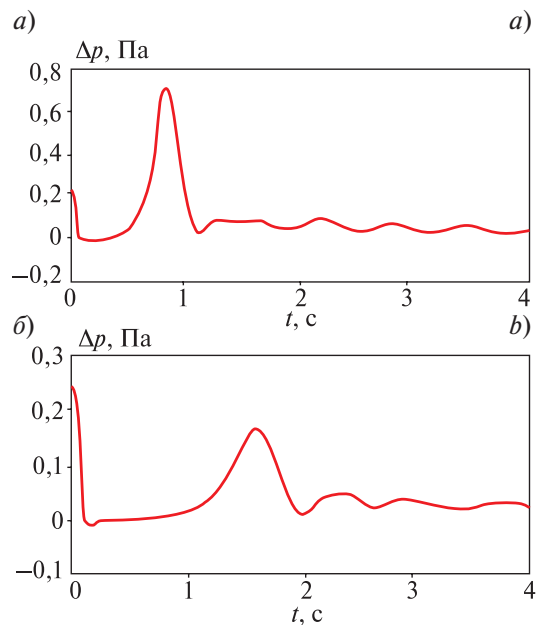
**Рис. 12.** Скорость вихревого кольца в моменты времени 0,5 (а), 0,8 (б), 0,9 (в), 1 (г), 1,5 (д), 2 (е), 3 (ж), 4 (з) в случае формирования вихревого кольца при помощи цилиндрической трубки

**Fig. 12.** Velocity of the vortex ring at times 0.5 (a), 0.8 (b), 0.9 (c), 1 (d), 1.5 (e), 2 (f), 3 (g), 4 (h) in the case of formation vortex ring using a cylindrical tube

Распределения максимального давления на преграде во времени показывает рис. 13. В момент столкновения вихревого кольца со стенкой наблюдается пик давления. Положение пика давления и его величина зависят от способа генерации вихревого кольца.

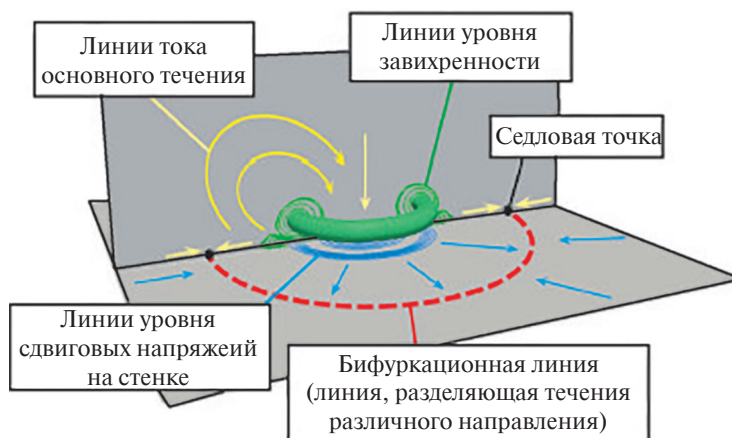
Изолинии напряжения сдвига на стенке показаны на рис. 14. Вырожденная бифуркационная линия совпадает с седловыми точками и показывает точку перехода между радиально расширяющимся потоком и стационарным течением в дальней зоне, увлекаемым в сторону вихря. Распределение напряжения сдвига подчеркивает изменения условий течения вблизи стенки, когда вихревое кольцо сталкивается со стенкой и развиваются вторичные вихри.

По мере приближения вихревого кольца к стенке, расположенной по нормали к направлению его распространения, вихревое кольцо начинает расширяться в радиальном направлении. Ядро вихря уменьшается, а завихренность по величине увеличивается за счет растяжения вихря. Пограничный слой образуется в результате индуцированного радиального течения из-за условия прилипания к стенке. Пограничный слой на стенке растет, прежде чем в конечном итоге отделиться и сформировать вторичный вихрь, который имеет направление вращения, противоположное основному вихрю. На рис. 14 показаны ключевые особенности потока и критические точки, которые развиваются при движении вихревого кольца. Вихревое кольцо визуализируется изоповерхностью критерия  $\lambda_2$  (собственное число тензора градиента скорости), а изолинии завихренности и изменения поля скоростей потока показаны в направлении нормали к стенке. Поле скорости характеризуется распределением завихренности, генерируемой вихревым кольцом, и приводит к радиально расширяющемуся потоку на поверхности преграды, который затем увлекается вверх и назад к центру вихревого кольца. Седловые точки указывают на изменение направления потока между радиально расширяющимся потоком и неподвижным потоком в дальней зоне, который также увлекается в сторону вихря. Изолинии завихренности показывают пограничный слой, формирующийся на стенке из-за близости вихревого кольца.



**Рис. 13.** Распределения максимального давления на преграде во времени в случае формирования вихревого кольца при помощи стенки с отверстием (а) и цилиндрической трубки (б)

**Fig. 13.** Distributions of the maximum pressure on the barrier in time in the case of the formation of a vortex ring using a wall with a hole (a) and a cylindrical tube (b)



**Рис. 14.** Структура течения, возникающего при приближении вихревого кольца к стенке

**Fig. 14.** Structure of the flow arising when the vortex ring approaches the wall

## 7. Заключение

На основе численных расчетов определены геометрические и гидродинамические характеристики вихревого кольца с учетом конструктивных особенностей вихревого генератора и исследован процесс формирования вихревого кольца при его импульсной генерации. Представлены зависимости характеристик формирования вихревых колец от параметров, определяющих условия их формирования.

Получены распределения давления и максимального давления на преграде во времени. Распределения максимального давления на преграде во времени имеют максимум, соответствующий моменту столкновения вихревого кольца со стенкой. Приведена качественная картина течения, возникающего при приближении вихревого кольца к стенке, а также показаны ключевые особенности потока и критические точки, которые развиваются при движении вихревого кольца. По мере приближения вихревого кольца к стенке наблюдается расширяющийся поток на поверхности преграды, который увлекается вверх и назад к центру вихревого кольца. Наличие седловых точек свидетельствует об изменении направления потока между радиально расширяющимся потоком и неподвижным потоком в дальней зоне.

Генератор вихревого кольца в виде стенки с отверстием обеспечивает существенно более интенсивную закрутку потока в процессе генерации по сравнению с генератором в виде цилиндрической трубки, а также большей скоростью распространения и интенсивностью вихревого движения в ядре, приводя к более высокому ударному воздействию на преграду.

Научное значение полученных результатов обусловлено фундаментальностью проблемы массообмена в гидродинамике и тем, что вихревое кольцо является примером изолированного концентрированного вихря. Закономерности, установленные при исследовании вихревых колец, связаны с вихревым характером течения и могут быть перенесены на другие концентрированные вихри. Практическое значение проведенных исследований связано с тем, что вихревые кольца нередко возникают в различных техногенных и природных процессах.

## Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00657), <https://rscf.ru/project/21-19-00657/>.

## Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-19-00657), <https://rscf.ru/project/21-19-00657/>.

## Литература

1. Saffman P.G. The velocity of viscous vortex rings // *Studies in Applied Mathematics*. 1970. Vol. 49. P. 371–380. doi:10.1002/sapm1970494371
2. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.
3. Алексеев С.В., Маркович Д.М., Семенов В.И. Турбулентная структура газонасыщенной импактной струи // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2002. № 5. С. 22–33.
4. Ахметов Д.Г. Формирование и основные параметры вихревых колец // *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42, № 5. С. 70–83.
5. Maxworthy T. The structure and stability of vortex rings // *Journal of Fluid Mechanics*. 1972. Vol. 51. P. 15–32. doi:10.1017/S0022112072001041
6. Maxworthy T. Some experimental studies of vortex rings // *Journal of Fluid Mechanics*. 1977. Vol. 81. P. 465–495. doi:10.1017/S0022112077002171
7. Shariff K., Verzicco R., Orlandi P. A numerical study of the three-dimensional vortex ring instabilities: viscous corrections and early nonlinear stage // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994. Vol. 279. P. 351–375. doi:10.1017/S0022112094003939
8. Ghosh D., Baeder J.D. High-order accurate incompressible Navier–Stokes algorithm for vortex-ring interactions with solid wall // *AIAA Journal*. 2012. Vol. 50, N 11. P. 2408–2422. doi:10.2514/1.J051537
9. Walker D.A., Smith C.R., Cerra A.W., Doliganski T.L. The impact of a vortex ring on a wall // *Journal of Fluid Mechanics*. 1987. Vol. 181. P. 99–140. doi:10.1017/S0022112087002027
10. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Kuibin P.A., Shtork S.I. Study of pressure shock caused by a vortex ring separated from a vortex rope in a draft tube model // *Journal of Fluids Engineering*. 2017. Vol. 139, N 8. P. 081103. doi:10.1115/1.4036264



11. Куйбин П.А., Скрипкин С.Г., Цой М.А., Шторк С.И. Моделирование удара вихревого кольца о твердую поверхность // Письма в журнал технической физики. 2019. Т. 45, Вып. 1. С. 38–41. doi:10.21883/PJTF.2019.01.47155.17527
12. Boldes U., Ferreri J.C. Behavior of vortex rings in the vicinity of a wall // *Physics of Fluids*. 1973. Vol. 16, N 11, 2005–2006. doi:10.1063/1.1694246
13. Ghosh D., Baeder J.D. Numerical simulation of vortex ring interactions with solid wall // *AIAA Paper*. 2011. N 2011–675.
14. Barker S.J., Crow S.C. Motion of two-dimensional vortex pairs in a ground effect // *Journal of Fluid Mechanics*. 1977. Vol. 82. P. 659–671. doi:10.1017/S0022112077000913
15. Luton J.A., Ragab S.A. The three-dimensional interaction of a vortex pair with a wall // *Physics of Fluids*. 1997. Vol. 9. 2967. doi:10.1063/1.869408
16. Orlandi P., Verzicco R. Vortex ring impinging on walls: axisymmetric and three-dimensional simulations // *Journal of Fluid Mechanics*. 1993. Vol. 256. P. 615–645.
17. Никулин В.В. Экспериментальное исследование взаимодействия вихревого кольца с твердой поверхностью в широком диапазоне скоростей его движения // *Теплофизика и аэромеханика*. 2014. Т. 21, № 5. С. 587–591.
18. Musta M.N. Interaction of a vortex ring with a cutting thin plate // *Measurement*. 2016. Vol. 88. P. 104–112. doi:10.1016/j.measurement.2016.03.040
19. Xu Y., Wang J.J. Flow structure evolution for laminar vortex rings impinging onto a fixed solid wall // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. Vol. 75. P. 211–219. doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.02.010
20. New T.H., Zang B. Head-on collisions of vortex rings upon round cylinders // *Journal of Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 833. P. 648–676. doi:10.1017/jfm.2017.599
21. New T.H., Gotama G.J., Vevek U.S. A large-eddy simulation study on vortex-ring collisions upon round cylinders // *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33. 094101. doi:10.1063/5.0057475
22. Bourne K., Wabono S., Ooi A. Numerical investigation of vortex ring ground plane interactions // *Journal of Fluids Engineering*. 2017. Vol. 139. P. 071105. doi:10.1115/1.4036159
23. Chu C.-C., Wang C.-T., Chang C.-C. Vortex ring impinging on a solid plane surface-vortex structure and surface force // *Physics of Fluids*. 1995. Vol. 7. P. 1391–1401. doi:10.1063/1.868527
24. Naguiba A.M., Koochesfahani M.M. On wall-pressure sources associated with the unsteady separation in a vortex ring/wall interaction // *Physics of Fluids*. 2004. Vol. 16. P. 2613–2622. doi:10.1063/1.1756914
25. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Капранов И.Е. Моделирование и визуализация формирования вихревого кольца, его распространения и переноса им пассивной примеси // *Вычислительные методы и программирование*. 2021. Т. 22, № 3. С. 182–199.
26. Volkov K. Multigrid and preconditioning techniques in CFD applications / *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications* / Z. Driss, B. Necib, H.-C. Zhang. Springer International Publishing, 2018. P. 83–149.
27. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Капранов И.Е. Численное моделирование распространения вихревого кольца и переноса им пассивной примеси // *Инженерно-физический журнал*. 2022. Т. 95, № 6. С. 1516–1525.
28. Dabiri J.O., Gharib M. Fluid entrainment by isolated vortex rings // *Journal of Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 511. P. 311–331. doi:10.1017/S0022112004009784
29. Ахметов Д.Г. Модель формирования вихревого кольца // *Прикладная механика и теоретическая физика*. 2008. Т. 49, № 6. С. 25–36.

## References

1. Saffman P.G. The velocity of viscous vortex rings. *Studies in Applied Mathematics*. 1970, 49, 371–380. doi:10.1002/sapm1970494371
2. Lavrentiev M.A., Shabat B.V. Problems of fluid dynamics and their mathematical models. *Moscow, Nauka*, 1973. 416 p. (in Russian).
3. Alekseenko S.V., Markovich D.M., Semenov V.I. Turbulent structure of a gas-liquid impinging jet. *Fluid Dynamics*. 2002, 37, 5, 684–694.
4. Akhmetov D.G. Formation and basic parameters of vortex rings. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001, 42, 5, 794–805.
5. Maxworthy T. The structure and stability of vortex rings. *Journal of Fluid Mechanics*. 1972, 51, 15–32. doi:10.1017/S0022112072001041
6. Maxworthy T. Some experimental studies of vortex rings. *Journal of Fluid Mechanics*. 1977, 81, 465–495. doi:10.1017/S0022112077002171

7. Shariff K., Verzicco R., Orlandi P. A numerical study of the three-dimensional vortex ring instabilities: viscous corrections and early nonlinear stage. *Journal of Fluid Mechanics*. 1994, 279, 351–375. doi:10.1017/S0022112094003939
8. Ghosh D., Baeder J.D. High-order accurate incompressible Navier–Stokes algorithm for vortex-ring interactions with solid wall. *AIAA Journal*. 2012, 50, 11, 2408–2422. doi:10.2514/1.J051537
9. Walker D.A., Smith C.R., Cerra A.W., Doliganski T.L. The impact of a vortex ring on a wall. *Journal of Fluid Mechanics*. 1987, 181, 99–140. doi:10.1017/S0022112087002027
10. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Kuibin P.A., Shtork S.I. Study of pressure shock caused by a vortex ring separated from a vortex rope in a draft tube model. *Journal of Fluids Engineering*. 2017, 139, 8, 081103. doi:10.1115/1.4036264
11. Kuibin P.A., Skripkin S.G., Tsoi M.A., Shtork S.I. Modeling the impact of a vortex ring on a solid surface. *Technical Physics Letters*. 2018, 44, 1222–1225. doi:10.1134/S1063785019010115
12. Boldes U., Ferreri J.C., Behavior of vortex rings in the vicinity of a wall. *Physics of Fluids*. 1973, 16, 2005. doi:10.1063/1.1694246
13. Ghosh D., Baeder J.D. Numerical simulation of vortex ring interactions with solid wall. *AIAA Paper*. 2011, 2011–675.
14. Barker S.J., Crow S.C. Motion of two-dimensional vortex pairs in a ground effect. *Journal of Fluid Mechanics*. 1977, 82, 659–671. doi:10.1017/S0022112077000913
15. Luton J.A., Ragab S.A. The three-dimensional interaction of a vortex pair with a wall. *Physics of Fluids*. 1997, 9, 2967. doi:10.1063/1.869408
16. Orlandi P., Verzicco R. Vortex ring impinging on walls: axisymmetric and three-dimensional simulations. *Journal of Fluid Mechanics*. 1993, 256, 615–645.
17. Nikulin V.V. Experimental study of interaction between a vortex ring and a solid surface for a wide range of ring velocities. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014, 21, 5, 561–565. doi:10.1134/S0869864314050047
18. Musta M.N. Interaction of a vortex ring with a cutting thin plate. *Measurement*. 2016, 88, 104–112. doi:10.1016/j.measurement.2016.03.040
19. Xu Y., Wang J.J. Flow structure evolution for laminar vortex rings impinging onto a fixed solid wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016, 75, 211–219. doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.02.010
20. New T.H., Zang B. Head-on collisions of vortex rings upon round cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017, 833, 648–676. doi:10.1017/jfm.2017.599
21. New T.H., Gotama G.J., Vevek U.S. A large-eddy simulation study on vortex-ring collisions upon round cylinders. *Physics of Fluids*. 2021, 33, 094101. doi:10.1063/5.0057475
22. Bourne K., Wabono S., Ooi A. Numerical investigation of vortex ring ground plane interactions. *Journal of Fluids Engineering*. 2017, 139, 071105. doi:10.1115/1.4036159
23. Chu C.-C., Wang C.-T., Chang C.-C. Vortex ring impinging on a solid plane surface-vortex structure and surface force. *Physics of Fluids*. 1995, 7, 1391–1401. doi:10.1063/1.868527
24. Naguiba A.M., Koochesfahani M.M. On wall-pressure sources associated with the unsteady separation in a vortex ring/wall interaction. *Physics of Fluids*. 2004, 16, 2613–2622. doi:10.1063/1.1756914
25. Volkov K.N., Emelyanov V.N., Kapranov I.E. Simulation and visualization of formation of vortex ring, its propagation and transportation of passive scalar. *Numerical Methods and Programming*. 2021, 22, 3, 182–199 (in Russian).
26. Volkov K. Multigrid and preconditioning techniques in CFD applications / CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications / Z. Driss, B. Necib, H.-C. Zhang. *Springer International Publishing*. 2018, 83–149.
27. Volkov K.N., Emelyanov V.E., Kapranov I.E. Numerical simulation of the propagation of a vortex ring and of the transfer of a passive impurity by it. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2022, 95, 6, 1489–1497. doi:10.1007/s10891-022-02617-5
28. Dabiri J.O., Gharib M. Fluid entrainment by isolated vortex rings. *Journal of Fluid Mechanics*. 2004, 511, 311–331. doi:10.1017/S0022112004009784
29. Akhmetov D.G. Model of vortex ring formation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2008, 49, 6, 909–918. doi:10.1007/s10808-008-0113-4

## Об авторах

ВОЛКОВ Константин Николаевич, ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, ORCID ID: 0000-0001-6055-2323, WoS ResearcherID: S-4492–2018, Scopus AuthorID: 8663950000, SPIN-код: 6690-8864, e-mail: dsci@mail.ru

ЕМЕЛЬЯНОВ Владислав Николаевич, профессор, доктор технических наук, ORCID ID: 0000-0001-6055-2323, Scopus AuthorID: 7004697417, SPIN-код: 9453-6312, e-mail: vlademelyanov@gmail.com

КАПРАНОВ Илья Евгеньевич, научный сотрудник, кандидат технических наук, ORCID ID: 0000-0003-4839-8137, e-mail: mrkap@yandex.ru