

УДК 532.5.032

© Р. Ю. Монахов^{*1}, А. А. Родионов¹, И. Е. Капранов², Н. Н. Шpileв¹, М. С. Яковчук³, 2024

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва

²АО «Инжиниринговый центр «Кронштадт»», 197760, ул. Макаровская, д. 2, литера Л,
вн. тер. г. Кронштадт, г. Санкт-Петербург

³БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, ул. 1-я Красноармейская, д.1, г. Санкт-Петербург
*monakhov-62@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И ЭВОЛЮЦИИ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ В КРУПНОМАСШТАБНОМ ГИДРОФИЗИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

Статья поступила в редакцию 22.10.2024, после доработки 12.11.2024, принята в печать 15.11.2024

Аннотация

Статья посвящена исследованиям процесса генерации и эволюции вихревых колец, формирующихся в водной среде при выбросе струи воды в затопленный объем. Представлены расчётные данные по известным из литературы соотношениям, а также результаты моделирования по вновь созданной методике. Обоснованы характеристики генератора вихревых колец в составе моделирующего стенда, созданного на базе крупномасштабного гидрофизического бассейна. Экспериментальные исследования проводились в условиях температурной стратификации среды и с разницей температур воды струи и бассейна. Результаты экспериментов по формированию и движению вихревых колец удовлетворительно соответствуют расчетным данным. При этом влияние сформированной в бассейне стратификации на характеристики вихревых колец оказалось незначительным. Выявлено существенное влияние безразмерной длины струи на основные характеристики вихревых колец и разницы между температурой воды на горизонте их формирования и температурой струи на траекторию движения колец.

Ключевые слова: вихревые кольца, вихревая динамика, струи, физический эксперимент

UDC 532.5.032

© R. Yu. Monakhov^{*1}, A. A. Rodionov¹, I. Ye. Kapranov², N. N. Shpilev¹, M. S. Yakovchuk³, 2024

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²JSC Engineering Center “Kronstadt”, 2, liter. L, Makarovskaya Str., in. ter. city of Kronstadt, St. Petersburg,
197760, Russia

³Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, 1 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg,
190005, Russia

*monakhov-62@mail.ru

NUMERICAL AND PHYSICAL MODELING OF GENERATION AND EVOLUTION OF VORTEX RINGS IN A LARGE-SCALE HYDROPHYSICAL WATER TANK

Received 22.10.2024, Revised 12.11.2024, Accepted 15.11.2024

Abstract

The article focuses on the study of vortex ring generation and evolution in aquatic environments resulting from the discharge of a water jet into a flooded volume. It presents computational data based on well-known relationships from the literature, as well as results from simulations using a newly developed methodology. The characteristics of the vortex ring generator within the experimental setup, created using a large-scale hydrophysical water tank, are justified. Experimental studies were conducted under conditions of thermal stratification of the medium, with a temperature difference between the water jet and the tank. The experimental results on vortex ring formation and motion show good agreement with the computational data. The influence of the thermal stratification in the water tank on the vortex ring characteristics was found to be negligible. A significant effect of the dimensionless jet length on the key characteristics of the vortex rings was observed, along with the temperature differences between the water layer at the formation horizon and the jet, impacting the rings' trajectory.

Keywords: vortex rings, vortex dynamics, jets, physical experiment

Ссылка для цитирования: Монахов Р.Ю., Родионов А.А., Капранов И.Е., Шpileв Н.Н., Яковчук М.С. Численное и физическое моделирование генерации и эволюции вихревых колец в крупномасштабном гидрофизическом бассейне // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 55–70. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-4

For citation: Monakhov R. Yu., Rodionov A. A., Kapranov I. Ye., Shpilev N. N., Yakovchuk M. S. Numerical and Physical Modeling of Generation and Evolution of Vortex Rings in a Large-Scale Hydrophysical Water Tank. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):55–70. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-4

1. Введение

Вихревые кольца, распространяющиеся в воде или атмосфере, представляют собой интересный физический феномен [1–3]. Будучи сформированными с помощью специального устройства (генератора), вихревые кольца слабо взаимодействуют с окружающей средой, существуют в течении достаточно продолжительного времени, и, перемещаясь в пространстве, в целом сохраняют свою форму и размеры. Деграция колец, в основном, обуславливается вязкой диссипацией, взаимодействием с твердыми преградами или границей раздела сред. Вихревые кольца [4–14] и смежные вопросы [15–22] неоднократно являлись предметом исследования и обсуждения. Для практического использования вихревые кольца и вихри исследовались [5, 15, 23–26], например, в интересах повышения эффективности подачи газообразного и жидкого огнегасителя в область горения при пожарах.

В настоящей работе численно и экспериментально исследуются процессы генерации и эволюции вихревых колец (ВК), формируемых при выбросе струи воды в затопленный объем через круглое отверстие заданного радиуса. Особенностью настоящего исследования является то, что эксперименты проводились в крупномасштабном гидрофизическом бассейне (облицовка из нержавеющей стали, длина 6 м, ширина 2 м, глубина 2 м, бассейн оборудован тремя группами теплообменников, позволяющих сформировать заданное распределение температуры воды по глубине) в условиях выраженной стратификации при вертикальном температурном градиенте более 10 °С/м.

2. Основные расчетные соотношения и результаты численного моделирования

По данным работ [4, 5, 6, 7, 23–26] практически все основные характеристики вихревого кольца, такие как его радиус, циркуляция, импульс и скорость зависят от трех параметров, связанных с генерацией ВК. Это продолжительность генерирующего импульса T (с), характерная скорость истечения струи из отверстия генерации V_0 (м/с) и радиус отверстия генерации R_0 (м). Данные параметры могут быть объединены в безразмерный комплекс, который называется безразмерная длина струи $\bar{L} = \frac{V_0 \cdot T}{R_0}$, выбрасываемой из круглого сопла в затопленный объем [23–26]. При расчете параметров вихревых колец также используется число Рейнольдса $Re = \frac{V_0 \cdot R_0}{\nu}$, построенное по радиусу отверстия R_0 (ν — коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с).

В соответствии с [23, 24] характеристики вихревых колец рассчитываются по формулам:

безразмерная длина $\bar{\lambda}$ пути формирования кольца,

$$\bar{\lambda} = a \cdot \ln[ch(c \cdot \bar{L})], \quad (1)$$

где $a = 2,424$ и $c = 0,1695$.

безразмерный $\bar{R}$ и размерный R (м) радиус кольца

$$\bar{R} = 1,0 + 0,125 \cdot \bar{L} - 0,25 \cdot \bar{\lambda}; R = \bar{R} \cdot R_0, \quad (2)$$

безразмерная $\bar{\Gamma}$ и размерная Γ (м²/с) циркуляция

$$\bar{\Gamma} = 0,4 + 0,5 \cdot \bar{L} - \bar{\lambda}; \Gamma = \bar{\Gamma} \cdot R_0 \cdot V_0. \quad (3)$$

Рассчитывается безразмерный $\bar{A}$ и размерный A (м) радиус тора:

$$\bar{A} = Re^{-1/4} \cdot \sqrt{\frac{(1+\beta) \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot \bar{R}}} \cdot \left(\int_0^{\bar{L}} \sqrt{\bar{L} + \bar{\lambda}} d\bar{z} - \frac{4}{3} \cdot \left[(\bar{L} + \bar{\lambda})^{3/2} - \bar{L}^{3/2} \right] \right)^{1/2}; \quad (4)$$

$$A = \bar{A} \cdot R_0; \bar{L} = \frac{l}{R_0},$$

где l — длина пути жидкости в сопле, м (в расчете и эксперименте 0,005 м); $\beta = 3,234$; $b = 5,22$ $z = V_0 \cdot t$;

$t \in [0; T]$; $\bar{z} = \frac{z}{R_0}$. Скорость перемещения вихревого кольца:

$$u_0 = \frac{\psi \cdot \Gamma}{4 \cdot \pi \cdot R} \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot R}{A} \right) - \frac{1}{4} \right], \quad (5)$$

где $\psi \approx 0,75$ — безразмерный коэффициент, определяемый из опыта [24].

Факультативно определяется также безразмерный $\bar{W}$ и размерный W (кг×м/с) импульс вихревого кольца, его безразмерная $\bar{E}$ и размерная E (Дж) энергия [24]:

$$\bar{W} = \bar{L} - 0,85 \cdot \bar{\lambda}; \quad W = \bar{W} \cdot \pi \cdot \rho \cdot R_0^3 \cdot V_0; \\ \bar{E} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \bar{R} \cdot \bar{\Gamma}^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot R}{A} \right) - \frac{7}{4} \right]; \quad E = \bar{E} \cdot \pi \cdot \rho \cdot R_0^3 \cdot V_0^2. \quad (6)$$

Приведенные выше зависимости не отвечают на вопрос об изменении параметров вихревых колец во времени (по пути движения) за счет вязкой диссипации. Кроме того, не ясен критерий определения радиуса тора. Поэтому ниже рассматривается численная модель, учитывающая потери на вязкую диссипацию и позволяющая построить траектории частиц жидкости.

По длине пути жидкости в сопле l (или по толщине передней стенки генератора, рассмотренного ниже) может быть построено число Рейнольдса $Re^{(l)} = \frac{V_0 \cdot l}{\nu}$, которое для условий эксперимента близко к 10^3 , что позволяет предполагать отсутствие высокочастотных турбулентных флуктуаций при торможении потока в сопле.

В рамках построения расчетной методики для координаты y от края отверстия к центру (рис. 11) в направлении нормальном к потоку рассматривается элементарный объем жидкости, представляющий собой тонкостенный цилиндр с длиной S (равной размерной длине струи), радиусом $R_0 - y$ и малой толщиной δ . Далее интервал $[0, R_0]$ разбивался на 500 отрезков шириной δ . На элементарный объем в момент времени t действует вязкое усилие

$$F(y, t) = \mu \cdot \frac{\left[u(y + \delta/2, t) - u(y - \delta/2, t) \right]}{\delta} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_0 - y) \cdot S; \quad (7)$$

Для скорости каждого пространственного слоя записываются обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$\frac{du(y, t)}{dt} = \frac{F(y, t)}{m(y)} = \nu \cdot \frac{\left[u(y + \delta/2, t) - u(y - \delta/2, t) \right]}{\delta^2} \quad (8)$$

с начальным условием $u(y, 0)$, которое определяется скоростным профилем, построенным для нулевого значения продольной координаты x (наружный край отверстия).

Выше

$$m(y) = \rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_0 - y) \cdot \delta \cdot S;$$

ρ — плотность воды, кг/м³; μ — коэффициент динамической вязкости, Па × с; ν — коэффициент динамической вязкости, м²/с.

При этом не входящая в (8) величина R_0 совместно с начальной скоростью струи учитывается при задании начального профиля скорости по поперечной координате y ($u(y, 0)$), а величина S , опять же совместно с начальной скоростью струи определяет время интегрирования (8).

По разработанной методике рассчитывались завихрённость течения (как величина ротора скорости с точностью до знака) $\zeta(y, t) = \frac{du(y, t)}{dy}$, угловая скорость потока $\omega(y, t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{du(y, t)}{dy}$ и угол поворота потока

$$\psi(y, t) = \int_0^t \omega(y, \tau) d\tau.$$

В двумерном приближении начало координат выбирается произвольная точка на краю отверстия. Ось y направлена к центру отверстия в плоскости стенки. Ось x нормальна к плоскости стенки. Если ввести ось z , образующую с упомянутыми осями правую тройку, то вектор ротор скорости будет направлен вдоль этой оси, а его величина составит $\frac{du(y, t)}{dy} - \frac{dv(y, t)}{dx}$. Предполагается и допускается, что вблизи отверстия производная скорости потока в поперечном направлении значительно превосходит по величине производную в продольном направлении.

Проекции скорости на координатные направления x (вдоль потока по оси генератора) и y и координаты частиц X и Y определяются из соотношений

$$u_x(y, t) = u(y, t) \cdot \cos[\psi(y, t)]; \quad u_y(y, t) = u(y, t) \cdot \sin[\psi(y, t)]; \quad (9)$$

$$X(y, t) = \int_0^t u_x(y, \tau) d\tau; \quad Y(y, t) = \int_0^t u_y(y, \tau) d\tau.$$

Траектории частиц, в зависимости от указанной на графиках координаты $\bar{y}$, отнесенной к радиусу отверстия, представлены на рис. 1.

Графики показывают, что чем ближе частицы потока к стенке генератора, тем более закручена траектория их движения.

На рис. 2 для двух последовательных моментов времени (1 с — красный цвет и 2,5 с — синий цвет) приведены зависимости проекции скорости на поперечное направление от безразмерной координаты $\bar{y}$. Очевидно, что координатам переходящих участков графиков к монотонным (точки «А» и «С») соответствуют радиусы торов, а координатам, где достигаются максимальные скорости в поперечном направлении — радиусам вихревого кольца (без учета радиуса отверстия, точки «В» и «D»). Графики иллюстрируют наблюдаемую в опыте эволюцию вихревых колец.

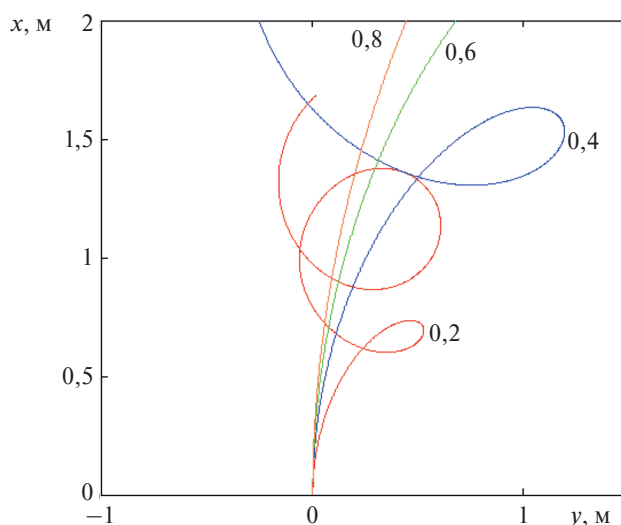


Рис. 1. Траектории частиц в зависимости от безразмерного расстояния $\bar{y}$ от края отверстия к центру, обозначенного цифрами на графике

Fig. 1. Particle trajectories as a function of the dimensionless distance $\bar{y}$ from the edge of the hole to the center, indicated by the numbers on the graph

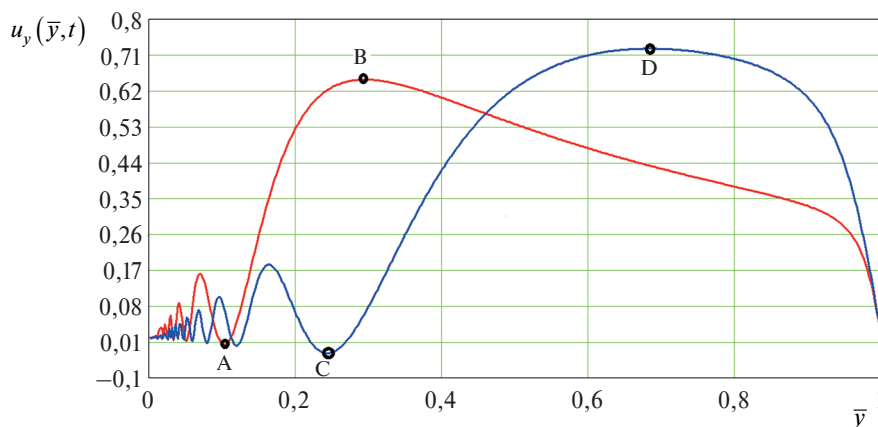


Рис. 2. Зависимости проекции скорости на поперечное направление от безразмерной координаты $\bar{y}$

Fig. 2. Dependences of the velocity projection on the transverse direction on the dimensionless coordinate $\bar{y}$

Для размерных длин струи 0,05, 0,1, 0,5 и 1 м (что соответствует, для $R_0 = 75$ мм, безразмерным длинам струи 1,33, 2,67, 13,3 и 26,7) построены зависимости безразмерного радиуса тора ($\bar{A} = A/R_0$) и безразмерного радиуса кольца ($\bar{R} = R/R_0$) от времени, приведенные на рис. 3 и 4 соответственно. Цифрами обозначены размерные длины струй.

Следует отметить, что для больших длин струй насыщения во времени не происходит, и безразмерный радиус тора становится близким к 1/2 (отмеченная эллипсом на рис. 3 область) — вихревое кольцо разрушается.

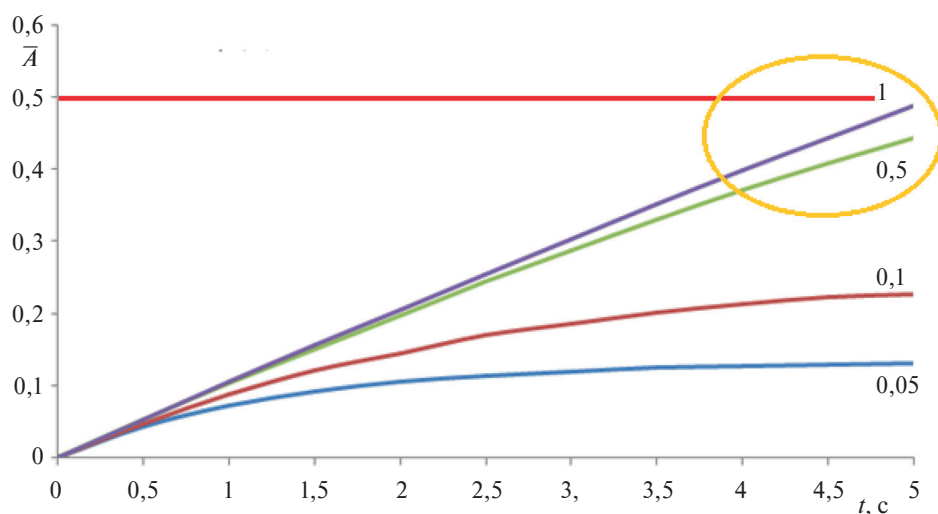


Рис. 3. Зависимости безразмерного радиуса тора от времени

Fig. 3. Dependence of the dimensionless torus radius on time

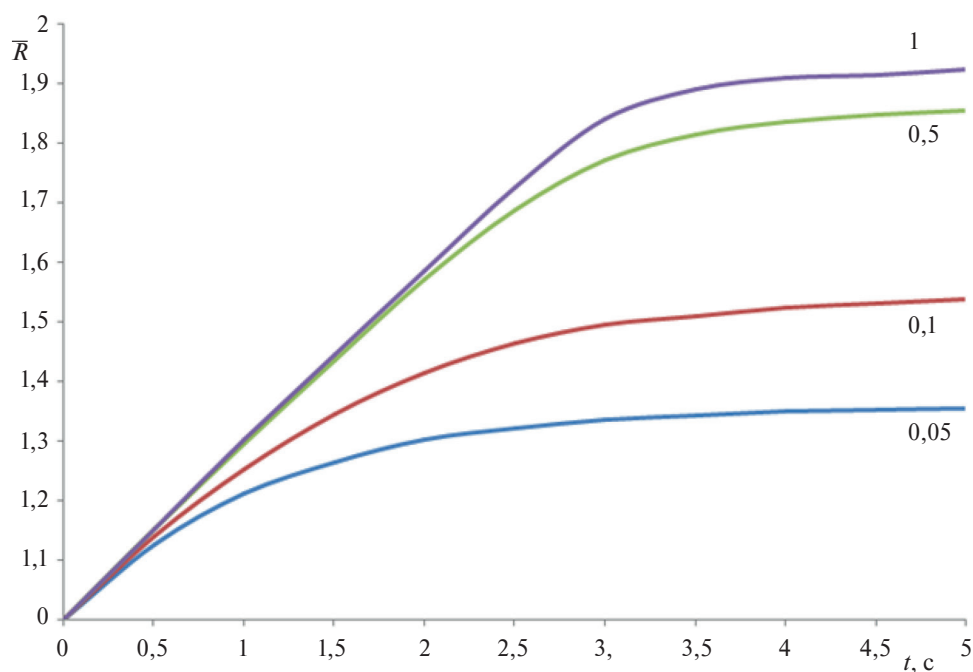


Рис. 4. Зависимости безразмерного радиуса вихревого кольца от времени

Fig. 4. Dependence of the dimensionless vortex ring radius on time

Напротив, через 2–3 секунды вне зависимости от длины струи для радиуса ВК происходит насыщение — радиус кольца практически не изменяется до его распада.

Графики зависимостей безразмерной завихренности от времени (для размерной длины струи 0,1 м) приведены на рис. 5. Цифрами обозначено безразмерное расстояние от края отверстия к оси струи. Графики демонстрируют деградацию ВК, обусловленную, в основном, вязкой диссипацией.

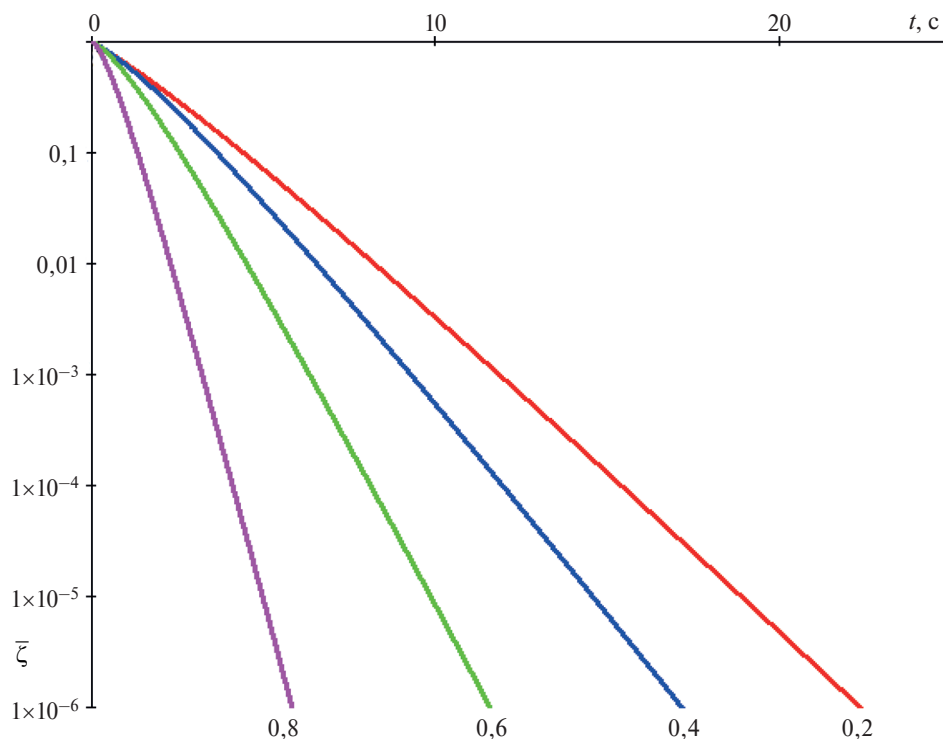
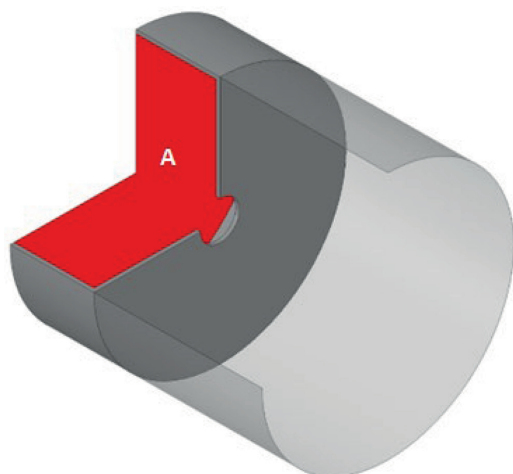


Рис. 5. Зависимость безразмерной завихренности от времени

Fig. 5. Dependence of the dimensionless vorticity on time

3. Конструкция генератора вихревых колец

Для генерации вихревых колец в воде будет использован генератор типа «стенка с отверстием» [4, 6], который позволяет формировать кольца с наиболее высокой интенсивностью вихревого движения, скоростью и дальностью распространения. Общий вид такого генератора представлен на рис. 6. Задача состоит в определении параметров генератора (скорость потока, время формирования струи и радиус отверстия) и подборе конструкции, обеспечивающей надежное формирование вихревых колец.



Запуск генератора типа «стенка с отверстием» возможен тремя способами:

- быстрым изменением запреградного объема (А на рис. 6) генератора, например за счет перемещения поршня;
- возбуждением колебаний упругой мембраны, разделяющей запреградный объем;
- импульсным подводом некоторого объема воды под избыточным давлением в запреградное пространство.

Рис. 6. Вариант генератора вихревых колец типа «стенка с отверстием»

Fig. 6. Vortex ring generator variant of the “wall with a hole” type

В последнем случае к камере генератора лабораторного стенда присоединяется электромеханический клапан, который и должен обеспечивать импульсный массоподвод воды для обеспечения нестационарного истечения из отверстия и формирования вихревого кольца.

Время формирования струи T можно определить, имея паспортное значение времени срабатывания клапана. Для выбранного варианта клапана оно составляет 0,05 с. Для цикла «открытие + закрытие», который применяется в случае генерации вихревого кольца, следует удвоенное время срабатывания, то есть 0,1 с.

Для первоначально принятого для расчета радиуса отверстия 12,7 мм (дюймовая труба) безразмерная длина струи составит примерно 300 и это значение лежит далеко за пределами диапазона, где возможна генерация устойчивых вихревых колец. В работах [23–26] эксперименты с воздушными вихревыми кольцами проводились до значений $\bar{L}$ не превышающих 20, а в работах [8–14] указанная безразмерная длина не превышала единиц. Большая длина струи препятствует локализации области сворачивания потока в вихревое кольцо. Происходит растяжение и разрушение этой области, что делает образование вихревой структуры невозможным. Указанные обстоятельства иллюстрируются зависимостью безразмерного радиуса тора $\bar{A}$ от безразмерной длины струи $\bar{L}$, представленной на рис. 7. Предельным, очевидно, является безразмерный радиус тора, равный 0,5.

Для создания генерирующей струи меньшей протяженности необходимо модифицировать параметры генерации, входящие в выражение для $\bar{L}$. Снижение $\bar{L}$ будет происходить при уменьшении времени T и скорости V_0 , а также при увеличении R_0 . Снижение T невозможно в силу технических ограничений на быстроедействие клапана, а V_0 зависит от давления на входе в рабочую камеру генератора и радиуса R_0 . Очевидно, что характер зависимости V_0 от R_0 таков, что при росте R_0 скорость V_0 будет падать. Таким образом, уменьшение безразмерной длины струи $\bar{L}$ возможно только путем увеличения радиуса R_0 относительно ранее принятого в расчете $R_0 = 12,7$ мм. Для $R_0 = 0,0375$ м безразмерная длина струи оказывается близкой к 10. На рис. 8–10 для этого случая представлены распределения модуля скорости для трех моментов времени, соответствующих этапу генерации вихревого кольца и начальной фазе его движения. Данные получены при моделировании с использованием пакета “Fluent” (с учетом [27, 28]) для макета, представленного на рис. 11. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной конфигурации. Она обеспечивает получение устойчивых вихревых колец с удовлетворительной динамикой закрутки потока и отрывом вихревой структуры с переходом в фазу движения.

Результаты расчета показывают необходимость в некоторых внутренних конструктивных элементах, которые способны обеспечить большую равномерность поля скорости и, соответственно, понизить максимальное ее значение, перед тем как поток подойдет к отверстию, обеспечивающему генерацию. Понижение скорости может быть достигнуто путем плавного увеличения поперечного сечения камеры. Однако в виду достаточно большого отношения площадей сечения клапана и отверстия генерации протяженность переходного участка плавного изменения скорости будет велика. Это существенно снижает компактность устройства и повышает гидравлические потери. Тем не менее этот способ может быть использован в сочетании с другими мерами.

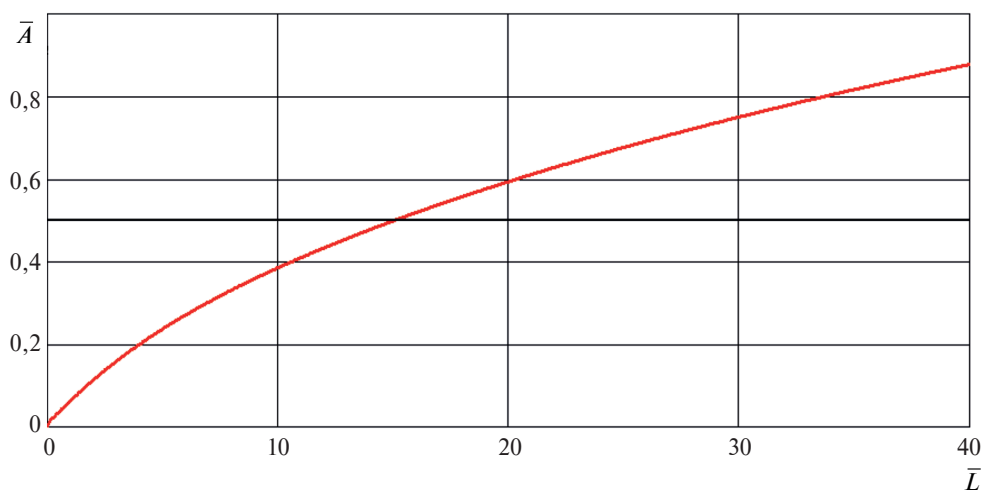


Рис. 7. Зависимость безразмерного радиуса тора от безразмерной длины струи

Fig. 7. Dependence of the dimensionless torus radius on the dimensionless jet length

Другим возможным вариантом снижения скорости является использование дефлекторов или перегородок, которые уведут поток от оси к периферии, где проходное сечение имеет большую площадь. Это приводит к значительному падению скорости на участке небольшой осевой протяженности. Для решения проблемы обеспечения равномерности поля скорости в поперечном сечении генератора перед выходным отверстием был предложен вариант с сочетанием дефлекторных элементов и участка плавного увеличения площади поперечного сечения.

Осесимметричный вариант конфигурации может быть изменен. В частности, возможен боковой под-вод потока. При этом конфигурация дефлекторов также может модифицироваться и представлять собой набор плоских перегородок, создающих лабиринтную структуру.

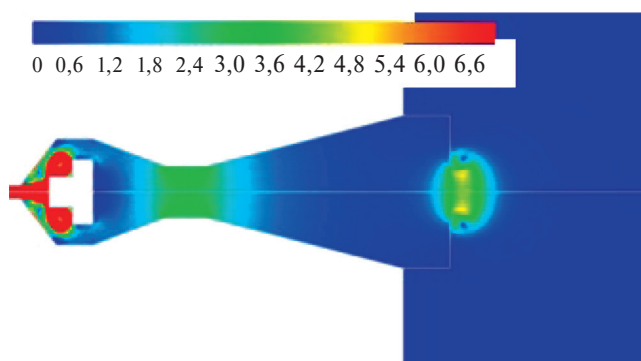


Рис. 8. Распределение модуля скорости (м/с) в момент времени $t = 0,05$ с

Fig. 8. Distribution of velocity magnitude (m/s) at time $t = 0.05$ s

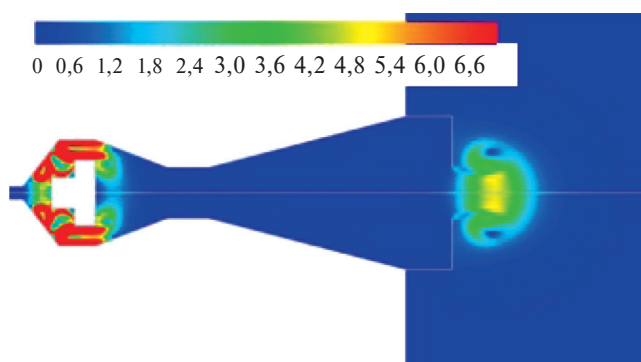


Рис. 9. Распределение модуля скорости (м/с) в момент времени $t = 0,1$ с

Fig. 9. Distribution of velocity magnitude (m/s) at time $t = 0.1$ s

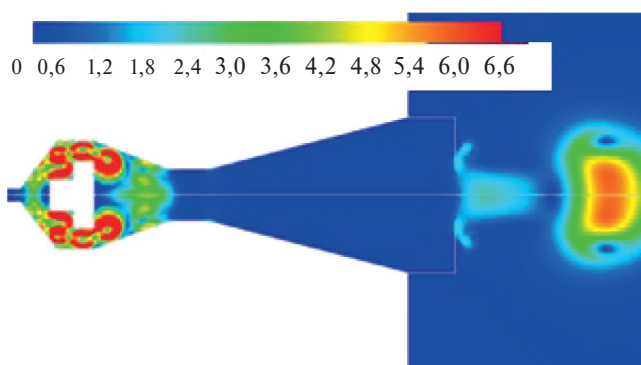


Рис. 10. Распределение модуля скорости (м/с) в момент времени $t = 0,3$ с

Fig. 10. Distribution of velocity magnitude (m/s) at time $t = 0.3$ s

Эксперименты проводились в крупномасштабном гидрофизическом бассейне СПб ФИО РАН. В качестве оконечного устройства стенда использовался рассмотренный выше генератор ВК, эскиз которого представлен на рис. 11. Внешний вид генератора показан на рис. 12.

Стендовое оборудование включает воздушный компрессор, аккумулятор сжатого воздуха, емкость с границей раздела воды и воздуха с наддувом воздушной части и формирования повышенного давления в магистрали подачи воды (бытовой гидроаккумулятор для индивидуальных систем водоснабжения). Исходя из возможностей компрессора были подобраны трубопроводы и арматура проходным сечением 25,4 мм. Давление, которое может обеспечить компрессор составляет 8 атм.

Исполнительным элементом, обеспечивающим подачу водного импульса для формирования вихрей, является ранее упомянутый быстродействующий электромагнитный клапан. Управление быстродействующим электромагнитным клапаном производится программируемым электронным блоком.

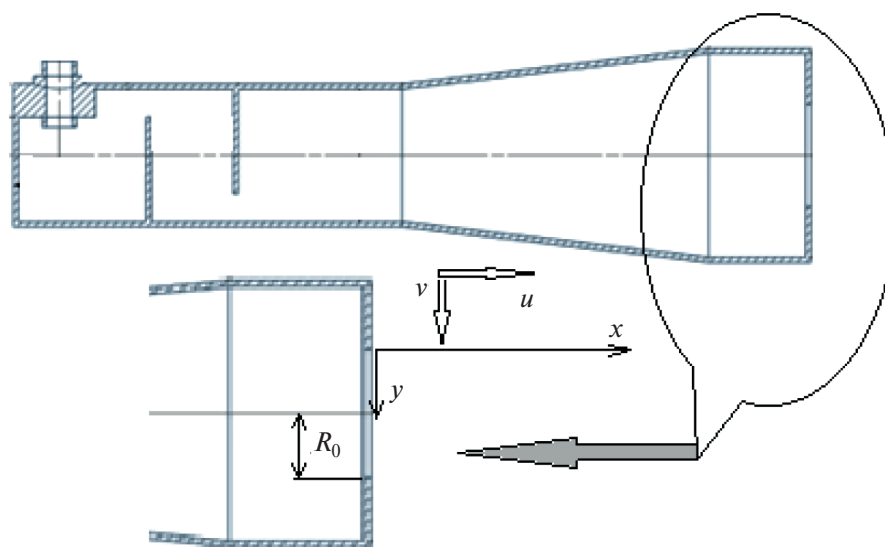


Рис. 11. Эскиз генератора вихревых структур. R_0 — радиус отверстия в стенке. В качестве начала координат выбирается произвольная точка на краю отверстия. Ось y направлена к центру отверстия в плоскости стенки. Ось x нормальна к плоскости стенки. u и v — проекции скорости на соответствующие координатные направления (x и y)

Fig. 11. Schematics of the vortex structure generator. R_0 is the radius of the hole in the wall. An arbitrary point on the edge of the hole is selected as the origin. The y axis is directed towards the center of the hole in the wall plane. The x -axis is normal to the wall plane. u and v are projections of velocity to the corresponding coordinate directions (x and y)

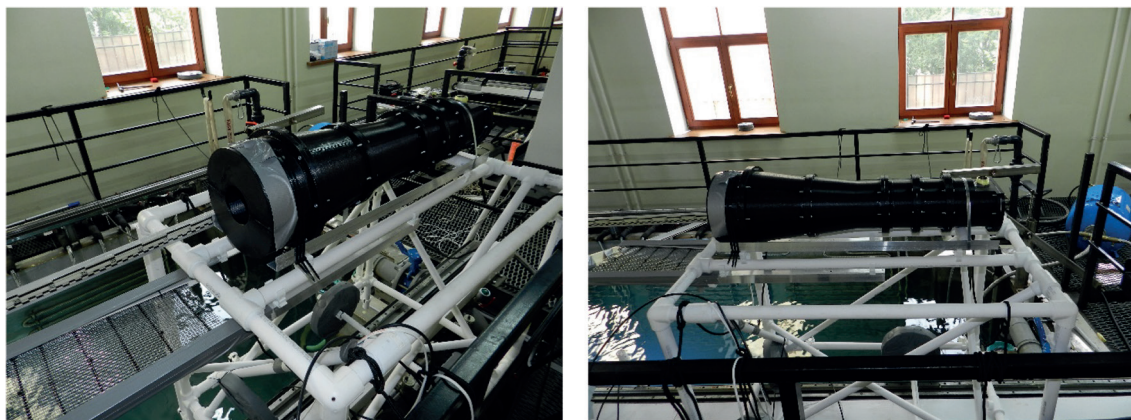


Рис. 12. Внешний вид генератора вихревых структур

Fig. 12. External view of the vortex structure generator

4. Результаты испытания макета генератора вихревых колец

В июне-июле 2024 года выполнены испытания макета генератора ВК на опытном стенде в крупномасштабном гидрофизическом бассейне СПбФ ИО РАН и проведены экспериментальные исследования.

Первоначально визуализация вихревых колец осуществлялась гидролизным газом, но в связи с тем, что пузырьки газа намного крупнее рэлеевского предела и быстро всплывают на поверхность, в экспериментах 2024 года визуализация производилась путем добавления в воду генератора раствора пищевого красителя.

В бассейне создавалась температурная стратификация — типичная зависимость температуры (Θ , °C) от глубины (H , м) приведена на рис. 13. Вблизи оси распространения вихрей на глубине 0.8–1 м градиент температуры составлял 12–14 °C/м.

На рис. 14–19 приведены типичные ситуации формирования и распространения ВК. В частности, на рис. 14 представлено вихревое кольцо, полученное при сравнительно малой безразмерной длине струи (длине струи (порядка 3.5). Возраст кольца — порядка 2,5–3 с. На рис. 15 ВК получено из струи с безразмерной длиной около 10. Возраст кольца тот же. На рис. 16 представлено ВК, полученное из струи с безразмерной длиной порядка 16. Снимок сделан приблизительно через 0,5–1 с после формирования ВК. На рис. 17 показано ВК, полученной из относительно длинной струи тёплой воды, причем архимедовы силы в стратифицированной среде обусловили всплытие и некоторый разворот ВК в вертикальной плоскости. Более быстрым оказывается всплытие кольца, сформированного из воды со значительным содержанием воздуха (рис. 18). На рис. 19 показан процесс разрушения кольца непосредственно при его формировании (безразмерная длина струи > 20).

По результатам обработки видеозаписи определялись радиусы вихревых колец и торов. Оценивалась ошибка измерения размеров кольца и тора, равная $\pm 0,5$ см.

Зависимость безразмерного радиуса кольца от безразмерной длины струи, формирующей ВК, приведена на рис. 20. Черным цветом обозначены данные опыта с учетом ошибок измерения (квадрат и вертикальные линии). Цифрами, означающими время в секундах от момента формирования кольца, обозначены графики, построенные по данным моделирования (рис. 3 и 4). Знаком « $\Rightarrow$ » обозначен график, построенный по данным работ [1, 2]. Соответствующая зависимость безразмерного радиуса тора от безразмерной длины струи, формирующей ВК, приведена на рис. 21 с теми же обозначениями.

На рис. 22 показаны зависимости угла разворота вихревого кольца в вертикальной плоскости в стратифицированной среде от продольной координаты. Цифрами на графиках обозначена безразмерная длина струи. Прямоугольником отмечена наблюдаемая в экспериментах область значений углов разворота.

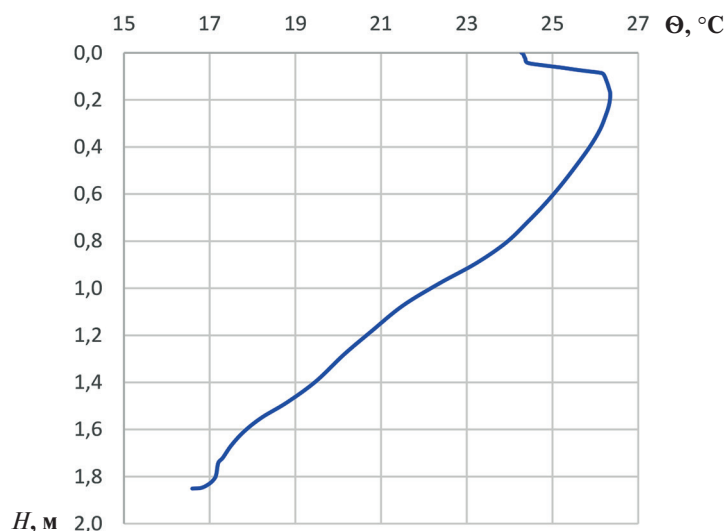


Рис. 13. Типичная зависимость температуры (Θ , °C) от глубины (H , м) в гидрофизическом бассейне

Fig. 13. Typical dependence of temperature (Θ , °C) on depth (H , m) in the hydrophysical water tank

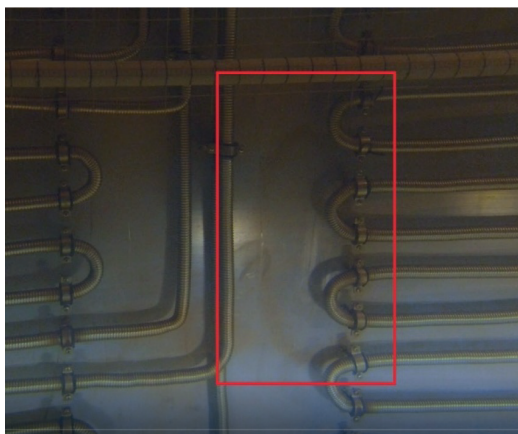


Рис. 14. ВК, полученное при безразмерной длине струи около 3,5.

Fig. 14. Vortex structure (VS) obtained at a dimensionless jet length of approximately 3.5



Рис. 15. ВК, полученное при безразмерной длине струи около 10.

Fig. 15. Vortex structure (VS) obtained at a dimensionless jet length of approximately 10

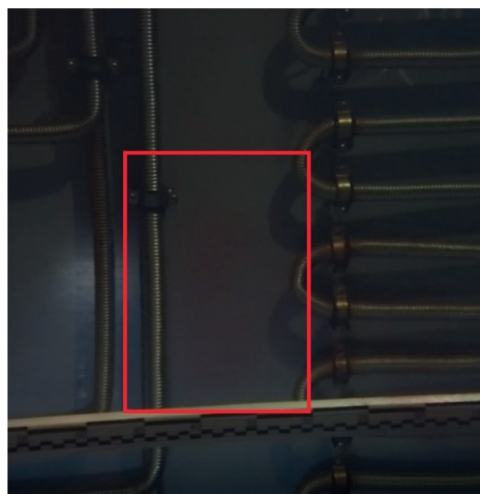


Рис. 16. ВК, полученное при безразмерной длине струи около 16

Fig. 16. Vortex structure (VS) obtained at a dimensionless jet length of approximately 16



Рис. 17. ВК из «теплой» струи с захватом воздуха

Fig. 17. Vortex structure from a “warm” jet with air entrainment



Рис. 18. ВК из сильно аэрированной струи

Fig. 18. Vortex structure from a highly aerated jet

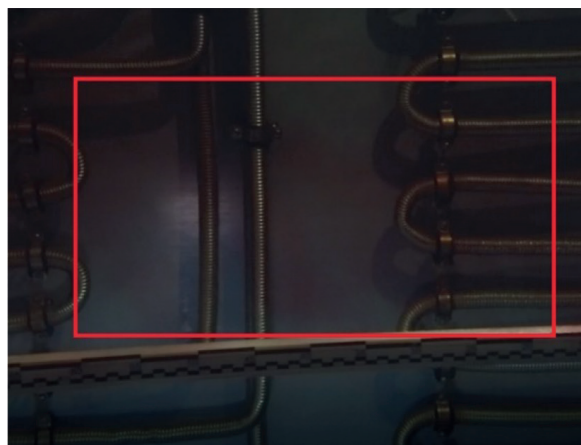


Рис. 19. Разрушение ВК при большой длине струи

Fig. 19. Destruction of the vortex structure at a large jet length

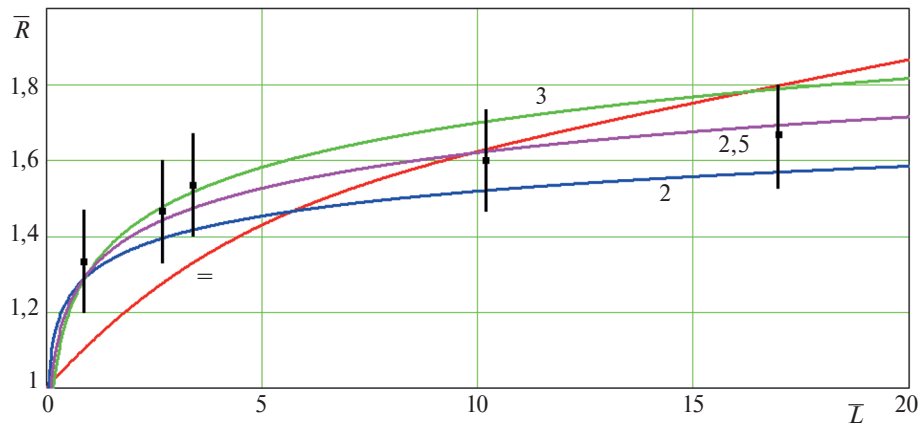


Рис. 20. Зависимость безразмерного радиуса кольца от безразмерной длины струи, формирующей ВК

Fig. 20. Dependence of the dimensionless radius of the ring on the dimensionless stroke length of the jet forming the vortex ring

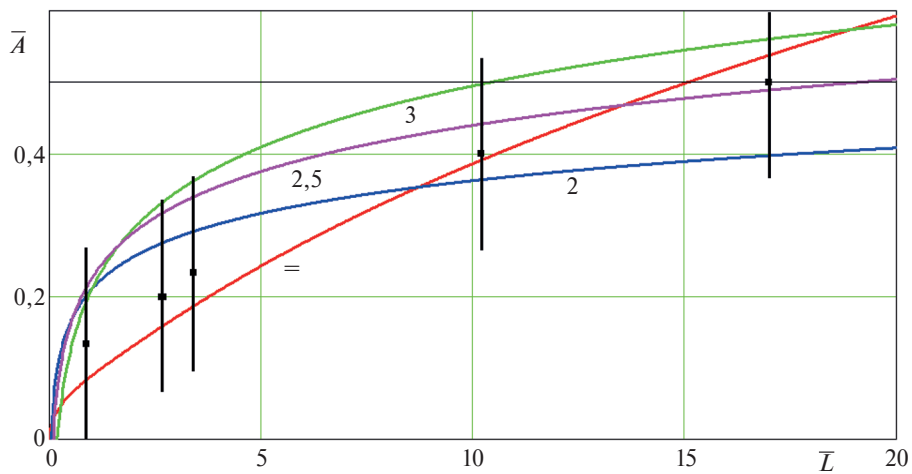


Рис. 21. Зависимость безразмерного радиуса тора от безразмерной длины струи, формирующей ВК

Fig. 21. Dependence of the dimensionless radius of the torus on the dimensionless stroke length of the jet forming the vortex ring

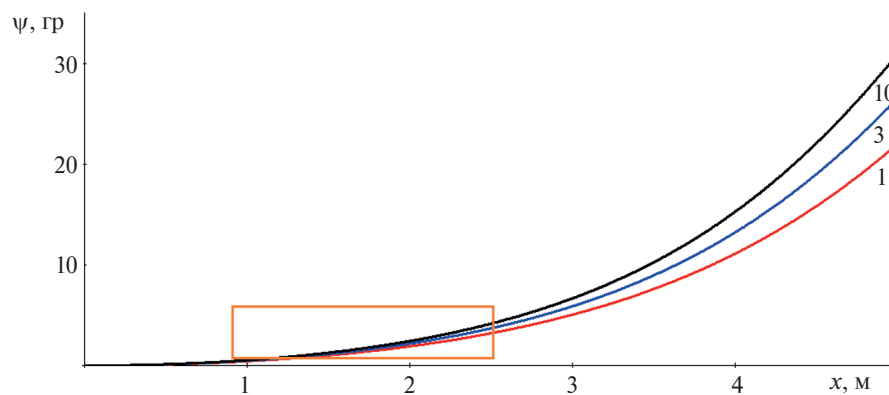


Рис. 22. Зависимость угла разворота вихревого кольца в вертикальной плоскости от продольной координаты

Fig. 22. Dependence of the vortex ring turning angle in the vertical plane on the longitudinal coordinate

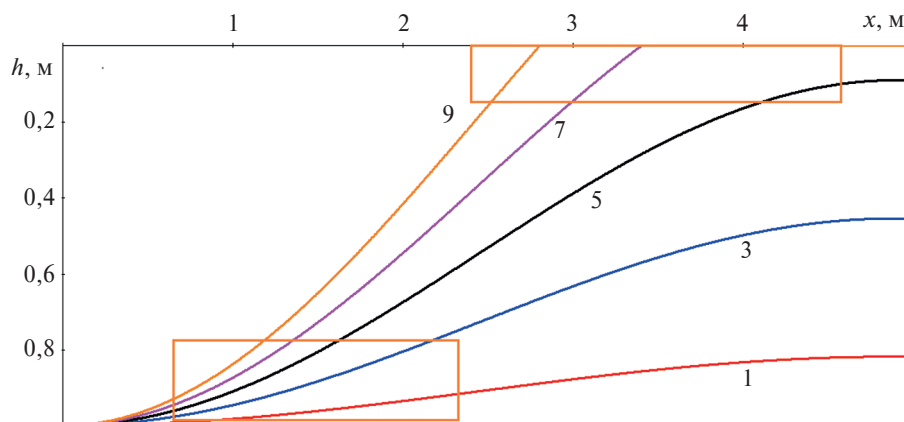


Рис. 23. Траектории вихревых колец в продольной плоскости при их всплытии

Fig. 23. Trajectories of vortex rings in the longitudinal plane during their surfacing

На рис. 23 представлены траектории вихревых колец в продольной плоскости при подаче в генератор тёплой в сравнении с температурой среды на горизонте установки генератора воды. Цифрами на графиках обозначено превышение температуры воды, подаваемой в генератор, над температурой на горизонте его установки; прямоугольниками отмечены наблюдаемые в экспериментах участки траекторий.

Результаты испытаний макета генератора ВК и экспериментальных исследований в гидрофизическом бассейне СПбФ ИО РАН позволяют сделать следующие выводы.

1. Размеры вихревых колец (рис. 20 и 21) достаточно близки к значениям, полученным при математическом моделировании при использовании как зависимостей, приведенных в источниках [1, 2 и др.], так и значений, полученных при решении уравнений (8) с разбиением расчетной области (от кромки отверстия до оси генератора) на 500 пространственных элементов.

2. При удовлетворительной безразмерной длине струи (порядка 10 и менее) вихревое кольцо формируется из воды, питающей генератор, массообмен с окружающей водной средой оказывается малым и кольцо сохраняет свою форму в течении первых десятков секунд, перемещаясь приблизительно на 5 метров (до противоположной стенки бассейна), незначительно увеличивая свои размеры (рис. 14 и 15).

3. При безразмерной длине струи более 20 вихревое кольцо практически разрушается в процессе формирования (рис. 19).

4. Значимое превышение температуры воды, питающей генератор, над температурой воды в бассейне на глубине установки генератора обуславливает быстрое всплытие даже хорошо сформированного кольца к поверхности с некоторым его вращением в продольной плоскости (рис. 17).

5. Достижение вихрем водной поверхности приводит к формированию двух плоских вихрей, вращающихся в противоположных направлениях и перемещающихся по поверхности.

6. Достижение вихревым кольцом дна или вертикальной преграды приводит к быстрому изменению исходной тороидальной формы и разрушению вихревого кольца.

7. Отрицательный температурный градиент (12–14 °С/м), обуславливающий также положительный пикноградиент ($\sim 6,5 \text{ кг/м}^4$), приводит к некоторому незначительному развороту колец в продольной плоскости в случае, когда температура воды, питающей генератор, близка к температуре воды в бассейне на глубине установки генератора ВК.

5. Заключение

В работе опытным путем на моделирующем стенде в крупномасштабном гидрофизическом бассейне (при выраженной стратификации с вертикальным температурным градиентом более 10 °С/м) подтверждены имеющиеся в литературных источниках и вновь полученные расчетные соотношения, описывающие процессы формирования и эволюции вихревых колец, зарождающихся в водной среде при выбросе струи воды в затопленный объем. Результаты математического моделирования удовлетворительно соответствуют результатам, полученным в опыте. Установлено, что в определенных условиях (при безразмерной длине струи, формирующей кольцо 10 и менее) массообмен с окружающей водной средой оказывается малым

и кольцо сохраняет свою форму в течении длительного времени, незначительно увеличивая свои размеры. Формирование генерирующей струи из более теплой в сравнении со средой воды, а также вертикальный температурный градиент обуславливают всплытие и незначительный разворот колец в продольной плоскости.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0029.

Funding

The work was performed under the State assignment FMWE-2024-0029.

Литература

1. *Владимиров В.А., Тарасов В.Ф.* Формирование вихревых колец // Известия СО АН СССР. Серия технических наук. 1980. № 3, вып. 1. С. 3–11.
2. *Вуд Р.* Вихревые кольца // Библиотечка «КВАНТ» выпуск 4. Опыты в домашней лаборатории. М., Наука: Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1981. С. 13.
3. *Бебиева Я.С.* Формирование затопленных струй при различных начальных условиях // Альманах современной науки и образования, Тамбов, «Грамота», 2011. № 12 (55). С. 25–27.
4. *Мелешко В.В., Константинов М.Ю.* Динамика вихревых структур // Киев: Наукова думка, 1993. С. 72–221.
5. *Тарасов В.Ф.* Оценка некоторых параметров турбулентного вихревого кольца // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. СО. Институт гидродинамики. 1973. Вып. 14. С. 120–127.
6. *Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н.* Генерация кавитационных вихревых колец в воде // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2014. № 1 (14). С. 71–74.
7. *Шмыглевский Ю.Д., Щепров А.В.* Об осесимметричных вихревых образованиях в вязкой жидкости // Журнал вычислительно математики и математической физики. 1995. Т. 35, № 3. С. 472–478.
8. *Ja'fari M., Shojae F.J., Jaworski A.J.* Synthetic jet actuators: Overview and applications // International Journal of Thermofluids. 2023. Vol. 20. P. 100438. doi:10.1016/j.ijft.2023.100438
9. *Zhou J., Tang H., Zhong S.* Vortex Roll-Up criterion for synthetic jets // AIAA Journal. 2009. Vol. 47, N 5. doi:10.2514/1.40602
10. *Barton L. Smith, David J. Nani.* Effect of orifice shape on synthetic efficiency. UTAH STATE UNIVERSITY, Logan, Utah, 2012.
11. *Jabbal M., Tang H., Zhong S.* The effect of geometry on the performance of synthetic jet actuators // Conference: 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS2006), At: Hamburg, Germany, September 2006.
12. *Tang H., Zhong S.* Incompressible flow model of synthetic jet actuator // AIAA Journal. 2006, Vol. 44, N 4, P. 908–912. doi:10.2514/1.15633
13. *Gharib M., Rambod E., Shariff K.* A universal time scale for vortex ring formation // Journal of Fluid Mechanics. 1998. Vol. 360. P. 121–140. doi:10.1017/S00221120970084107
14. *Xiong D., Zhixun X., Zhenbing L., Lin W.* A novel optimal design for an application-oriented synthetic jet actuator // Chinese Journal of Aeronautics. 2014. 27(3) P. 514–520. doi:10.1016/j.cja.2014.04.002
15. *Ганеев Р.А., Хафизов И.Ф., Бакиров И.К., Зарипова Л.Х.* Исследование вихревых потоков жидкости для повышения эффективности приборов пожаротушения // Нефтегазовое дело. 2022. № 6. С. 30–43. doi:10.17122/ogbus-2022-6-30-43
16. *Гущин В.А., Матюшин П.В.* Механизм образования вихрей в следе за сферой для диапазона $200 < Re < 380$ // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. № 5. С. 135–151.
17. *Гущин В.А., Матюшин П.В.* Математическое моделирование пространственных течений несжимаемой жидкости // Математическое Моделирование. 2006. Т. 18, № 5. С. 5–20.
18. *Дудолодов И.В., Таганов Г.И.* Объединение вихревых образований в плоском течении несжимаемой жидкости // Ученые записки ЦАГИ. 1977. Т. VIII, № 4. С. 29–33.
19. *Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д.* Регулярные и сингулярные компоненты периодических движений в толще жидкости // Прикладная математика и механика. 2007. Т. 71, Вып. 5. С. 844–854.
20. *Луговцов Б.А.* Турбулентные вихревые кольца // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. СО Институт гидродинамики. 1979. Вып. 38. С. 71–88.
21. *Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В., Тряпина В.А.* Визуализация структуры течения в противоточной вихревой трубе // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15, № 10. С. 439–447

22. Чашечкин Ю.Д., Байдулов В.Г., Бардаков Р.Н., Васильев А.Ю., Кистович А.В., Миткин В.В., Прохоров В.Е., Степанова Е.В. Механика свободных стратифицированных течений // Препринт ИПМех РАН № 876. М.: ИПМех РАН. 2008. 127 с.
23. Ахметов Д.Г. Модель формирования вихревого кольца // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49, № 6(292). С. 909–918.
24. Ахметов Д.Г. Формирование и основные параметры вихревых колец // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 5(262). С. 70–83.
25. Ахметов Д.Г., Тарасов В.Ф. О структуре и эволюции вихревых ядер // Прикладная механика и техническая физика. 1986. Т. 27, № 5. С. 68–73.
26. Ахметов Д.Г. Вихревые кольца. Новосибирск: Гео, 2007. 151 с.
27. Волков К.Н. Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91).
28. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М, 2008. 368 с.

References

1. Vladimirov V.A., Tarasov V.F. The formation of vortex rings. *Izvestiya. SB AN USSR. Seria Technicheskikh Nauk*. 1980;3(1):3–11. (in Russian).
2. Wood R. *Vortex Rings*. Library “QUANTUM” issue 4. Experiments in a home laboratory. М.: Nauka; Gl. ed. Phys. mat. lit. 1981. P. 13. (in Russian).
3. Bebieva Ya.S. Formation of flooded jets under various initial conditions. *Almanac of Modern Science and Education*. Tambov: Gramota; 2011. № 12 (55). P. 25–27. (in Russian)
4. Meleshko V.V., Konstantinov M. Yu. Dynamics of vortex structures. Kiev: Naukova dumka; 1993. P. 72–221 (In Russian).
5. Tarasov V.F. Evaluation of some parameters of a turbulent vortex ring // Dynamics of a continuous medium: Collection of scientific Tr. / USSR Academy of Sciences. Siberian Branch. Institute of Hydrodynamics. 1973;14:120–127 (In Russian).
6. Teslenko V.S., Drozhzhin A.P., Medvedev R.N. Generation of cavitation vortex rings in water. *Modern Science: Research, Ideas, Results, Technologies*. 2014;1(14):71–74 (In Russian).
7. Shmyglevsky Yu.D., Shcheprov A.V. Axisymmetric vortex formations in a viscous liquid. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1995;35(3):379–382.
8. Ja’fari M., Shojae F.J., Jaworski A.J. Synthetic jet actuators: Overview and applications. *International Journal of Thermofluids*. 2023;20:100438. doi:10.1016/j.ijft.2023.100438
9. Zhou J., Tang H., Zhong S. Vortex Roll-Up criterion for synthetic jets. *AIAA Journal*. 2009;47(5). doi:10.2514/1.40602
10. Barton L. Smith, David J. Nani. Effect of orifice shape on synthetic efficiency. UTAH STATE UNIVERSITY, Logan, Utah, 2012.
11. Jabbal M., Tang H., Zhong S. The effect of geometry on the performance of synthetic jet actuators. *Conference: 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS2006)*, At: Hamburg, Germany, September 2006.
12. Tang H., Zhong S. Incompressible flow model of synthetic jet actuator. *AIAA Journal*. 2006;44(4):908–912. doi:10.2514/1.15633
13. Gharib M., Rambod E., Shariff K. A universal time scale for vortex ring formation *Journal of Fluid Mechanics*. 1998;360:121–140. doi:10.1017/S0022112097008410
14. Xiong D., Zhixun X., Zhenbing L., Lin W. A novel optimal design for an application-oriented synthetic jet actuator. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014;27(3):514–520. doi:10.1016/j.cja.2014.04.002
15. Ganeev R.A., Hafizov I.F., Bakirov I.K., Zaripova L.H. Investigation of vortex fluid flows to increase the efficiency of fire extinguishing devices. *Oil and Gas Business*. 2022;6:30–43. doi:10.17122/ogbus-2022-6-30-43 (in Russian).
16. Gushchin V.A., Matyushin P.V. Vortex formation mechanisms in the wake behind a sphere for $200 < RE < 380$. *Fluid Dynamics*. 2006;41(5):795–809. doi:10.1007/s10697-006-0096-x
17. Gushchin V.A., Matyushin P.V. Mathematical modelling of the 3D incompressible fluid flows. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2006;18(5): 5–20 (In Russian).
18. Dudoladov I.V., Taganov G.I. Unification of vortex formations in a flat incompressible fluid flow. *Scientific Notes of TsAGI*. 1977; VIII(4):29–33 (in Russian).
19. Kistovich A.V., Chashechkin Yu.D. Regular and singular components of periodic of flows in the fluid interior. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2007;71(5):762–771.

20. Lugovtsov B.A. Turbulent vortex rings. *Dynamics of a continuous medium: Collection of scientific tr.* USSR Academy of Sciences. Siberian Branch. Institute of Hydrodynamics. 1979;38:71–88 (In Russian).
21. Piralishvili Sh.A., Veretennikov S.V., Tryapina V.A. Flow structure visualization in the reverse-flow vortex tube. *Thermal Processes in Engineering*. 2023;15(10):439–447 (In Russian).
22. Chashechkin Yu.D., Baidulov V.G., Bardakov R.N., Vasiliev A. Yu., Kistovich A.V., Mitkin V.V., Prokhorov V.E., Stepanova E.V. Mechanics of free stratified flows. Preprint IPMeh RAS No. 876. M.: IPMeh RAS; 2008. 127 p. (In Russian).
23. 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
24. Akhmetov D.G. Formation and basic parameters of vortex rings. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001;42(5):794–805.
25. Akhmetov D.G., Tarasov V.F. On the structure and evolution of vortex nuclei. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1986;27(5):68–73.
26. Akhmetov D.G. *Vortex rings*. Novosibirsk: Geo; 2007. 151 p. (in Russian).
27. Volkov K.N. Methods of visualization of vortex flows in computational gas dynamics and their application in solving applied problems. *Scientific and Technical Bulletin of information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014;3(91). (in Russian).
28. Volkov K.N., Yemelyanov V.N. Modeling of large vortices in calculations of turbulent flows. M., 2008. 368 p. (in Russian).

Об авторах

МОНАХОВ Роман Юрьевич, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат технических наук ИО РАН, SPIN-код (РИНЦ): 8078-0868, e-mail: monakhov-62@mail.ru

РОДИОНОВ Анатолий Александрович, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» СПбФ ИО РАН, член-корреспондент РАН, профессор, ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021, SPIN-код (РИНЦ): 5277-4598, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru

КАПРАНОВ Илья Евгеньевич, ведущий инженер по расчетам, АО «Инжиниринговый центр «Кронштадт»», кандидат технических наук, РИНЦ AuthorID: 546230, e-mail: mrkap@yandex.ru.

ШПИЛЕВ Николай Николаевич, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0003-3638-3253, SPIN-код (РИНЦ): 9945-2125, e-mail: nn.shpilev@gmail.com

ЯКОВЧУК Михаил Сергеевич, доцент БГТУ «ВОЕМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-9770-0841, Scopus AuthorID: 57039066300, SPIN-код (РИНЦ): 4569-2340, e-mail: mjakovchuk@mail.ru