

Научная статья

УДК 532.5

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-48-60

Численное исследование течения в вихревой камере с кольцевой преградой на нижней торцевой стенке

**Надежда Петровна Скибина*, Владимир Викторович Терехов
Виктор Иванович Терехов**

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
Новосибирск, Россия

*uss.skibina@gmail.com

Аннотация

В работе представлены результаты численного исследования течения в осесимметричной вихревой камере при наличии кольцевой преграды на торцевой стенке. Число Рейнольдса, определяемое по величине среднерасходной скорости в тангенциальных щелях завихрителя и радиусу камеры составляет $Re = 3,4 \cdot 10^4$. Путем прямого сеточного разрешения пространственных масштабов течения вязкого несжимаемого воздуха получены данные о распределении статического давления на стенках камеры, а также поля скорости во внутреннем объеме. Расчеты проведены как для камеры с гладкой нижней торцевой стенкой, так и при наличии на ней кольцевой преграды. Диаметр преграды варьировался и относительно диаметра выходного отверстия камеры принимал значения $1D$, $2D$ и $3,43D$. Высота преграды сохранялась неизменной и в каждом рассмотренном случае составляла $0,3D$. Анализ влияния преграды проведен путем сопоставления результатов с распределениями в камере с гладкой торцевой стенкой. Установлено, что размещение преграды приводит к росту статического давления вблизи оси и увеличению сопротивления камеры, оказывая при этом влияние на сдвиговые напряжения в торцевом пограничном слое и закономерности движения среды во всем объеме вихревой камеры.

Ключевые слова

численное моделирование, вихревая камера, радиальный градиент давления, торцевой эффект

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант №24-19-00358.

Для цитирования

Скибина Н. П., Терехов В. В., Терехов В. И. Численное исследование течения в вихревой камере с кольцевой преградой на нижней торцевой стенке // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 3. С. 48–60. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-48-60

© Скибина Н. П., Терехов В. В., Терехов В. И., 2025

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2025. Том 20, № 3
Siberian Journal of Physics, 2025, vol. 20, no. 3

Numerical Analysis of Swirling Flow in a Vortex Chamber Featuring an Annular Lower End-Wall Obstruction

Nadezhda P. Skibina*, Vladimir V. Terekhov,
Viktor I. Terekhov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

*uss.skibina@gmail.com

Abstract

This paper presents the results of a numerical study of flow in an axisymmetric vortex chamber with an annular obstruction on the end wall. The Reynolds number, based on the average flow velocity in the tangential slots of the swirl generator and the chamber radius, was $Re = 3,4 \cdot 10^4$. Using direct grid resolution of the spatial scales of the viscous incompressible air flow, data were obtained on the distribution of static pressure on the chamber walls, as well as the velocity field in the internal volume.

Calculations were performed both for a chamber with a smooth lower end wall and for one with an annular obstruction. The diameter of the obstruction was varied relative to the diameter of the chamber's outlet orifice, taking values of $1D$, $2D$, and $3,43D$. The height of the obstruction remained constant at $0,3D$ in all cases considered.

The analysis of the obstruction's influence was carried out by comparing the results with the distributions in the chamber with a smooth end wall. It was found that the placement of the obstruction leads to an increase in static pressure near the axis and an increase in the chamber's resistance, while also affecting the shear stresses in the end-wall boundary layer and the flow patterns throughout the entire volume of the vortex chamber.

Keywords

numerical simulation, vortex chamber, radial pressure gradient, end-wall effect

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), №24-19-00358

For citation

Skibina N. P., Terekhov V. V., Terekhov V. I. Numerical study of flow in vortex chamber with annular obstruction on the down end wall. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 3, p. 48–60. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-48-60

Введение

Закрученные потоки находят широкое применение в технических приложениях – от аппаратов очистки воздуха до камер сгорания и систем управления потоками в плазменных реакторах [1–6]. Принцип работы устройств, связанных с формированием закрученного течения, основан на использовании центробежных сил, под действием которых тяжелые частицы отбрасываются к периферии, а легкая фаза концентрируется вблизи оси.

Баланс центробежных сил и радиального градиента давления выполняется в зоне свободного вихря, однако вблизи торцевой стенки это равновесие нарушается и происходит кардинальная перестройка течения [7; 8]: окружная компонента скорости становится равной нулю, центробежная сила исчезает, а несбалансированный радиальный градиент давления инициирует движение среды из пограничного слоя на стенках в приосевую область, откуда она выбрасывается из внутреннего объема камеры за ее пределы. Данное явление носит название торцевого эффекта [9; 10], управление которым обеспечивает повышение эффективности и стабильности целого класса промышленных устройств. Влияние торцевых эффектов прямо пропорционально величине радиального градиента давления. Таким образом, высокие радиальные градиенты давления на торцевой стенке обеспечивают эффективную работу топочных устройств и вихревых камер сгорания, а низкие необходимы для стабильной работы систем очистки – например пылеуловителей или сепараторов.

Для управления торцевым эффектом применяют геометрическое профилирование вихревых камер [11–13], использование вращающихся стенок [14–18] и размещение препятствий,

подавляющих движение среды в приосевую область. Однако ввиду различных конфигураций вихревых камер, определенного их целевого использования и широкого диапазона режимов работы внутренние закрученные течения имеют разнообразную структуру, что затрудняет выработку универсальных рекомендаций. В данной работе объектом исследования является закрученное течение, формирующееся в вихревой камере с боковым завихрителем [19], движение среды в которой происходит через торцевые пограничные слои и выносится приосевой закрученной струей через диафрагму. Предметом исследования является структура течения во внутреннем объеме камеры при наличии кольцевой преграды на нижней торцевой стенке, а именно распределения осевой, радиальной и окружной компонент скорости, статического давления и его градиента в радиальном направлении. Целью работы является анализ влияния кольцевой преграды как на структуру ограниченного закрученного течения в целом, так и на локальные изменения в пограничном слое на нижней торцевой стенке и в приосевой зоне.

Постановка задачи

Схема осесимметричной камеры, закрутка в которой реализуется путем подачи воздуха через щели на боковой поверхности, представлена на рис. 1, а. Боковой завихритель обеспечивает равномерность потока, снижает уровень пульсаций приосевой струи и гидравлическое сопротивление как вихревой камеры, так и завихрителя, а также обеспечивает защиту стенок камеры от негативного воздействия высокотемпературной или химически агрессивной среды [20]. Диаметр камеры составляет $D_K = 202$ мм, а высота – $H = 198$ мм. Выходное отверстие диаметром $D = 30$ мм расположено на одной из торцевых стенок вихревой камеры. Трубки, через которые осуществляется подача воздуха во внутренний объем камеры, расположены тангенциально относительно боковой стенки с шагом 90° и образуют четыре группы по 10 отверстий в каждой. Расстояние между отверстиями $s = 15$ мм, а общая их площадь составляет $f = 502,65$ мм².

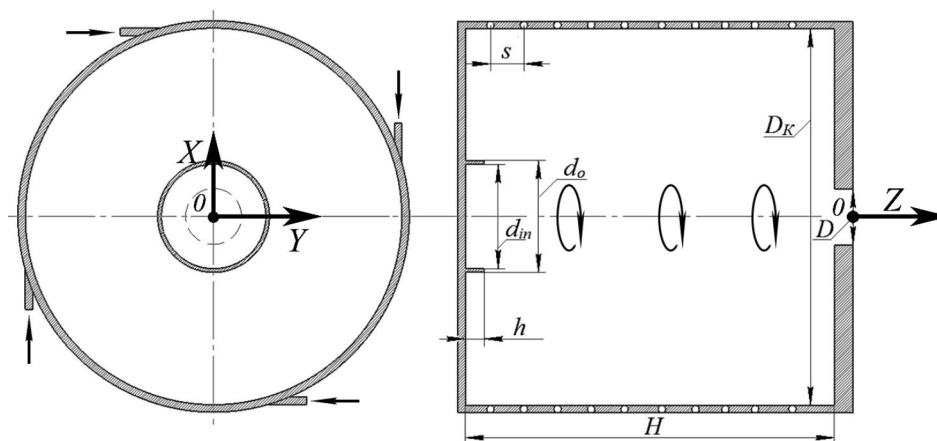


Рис. 1. Схема камеры с кольцевым препятствием и обозначением основных размеров

Fig. 1. Schematic of the chamber with an obstruction and key dimensions

В работе рассматривается вихревая камера с гладкой торцевой стенкой [19] и камера, на нижней стенке которой расположена кольцевая преграда – тонкостенный цилиндр фиксированной высоты ($h = 10$ мм), ограниченный коаксиальными окружностями, размеры которых варьировались. Диаметры внешней и внутренней окружностей d_o и d_{in} соответственно, приведены в табл. 1. Для камеры без преграды $d_o = d_{in} = h = 0$ мм.

Таблица 1

Размеры кольцевого препятствия на торцевой стенке камеры

Table 1

Dimensions of the annular obstruction on the chamber end wall

№	d_o , мм	d_{in} , мм	d_o/D
1	30	28	1
2	60	56	2
3	103	100	3,43

Массовый расход в щелях составляет 3 г/с, температура вдвухаемого воздуха $T = 293\text{K}$, число Рейнольдса, определяемое по величине среднерасходной скорости в щелях и радиусу камеры составляет $\text{Re} = \frac{\rho U D}{2\mu} = 3,4 \cdot 10^4$.

Постановка задачи и методика расчета

Результаты исследований получены путем численного решения системы нестационарных трехмерных уравнений Навье – Стокса, записанных для вязкой несжимаемой среды. В качестве начального распределения во всей области решения задачи задается нулевое поле скорости ($w_z = u_R = v_\phi = 0$) и постоянное давление $p = 10^5$ Па. На твердых поверхностях выполняется условие прилипания: $w_z = u_R = v_\phi = 0$, где w_z , u_R , v_ϕ – осевая, радиальная и окружная компоненты скорости в цилиндрической системе координат соответственно.

Решение нестационарных уравнений Навье – Стокса производится методом конечных объемов без использования моделей турбулентности и подсеточных функций. Пространственное разрешение вихревых структур от крупных до мелкомасштабных обеспечивается сеточным разбиением. Размеры ячеек в областях наибольшей диссипации, а именно в пограничном слое на боковой и торцевых стенках камеры, не превышают 10^{-6} м. Определение шага по времени производится из условия $\text{CFL} < 1$, где CFL – число Куранта (критерий Куранта – Фридрихса – Леви). Ввиду существенной нестационарности исследуемого течения анализ проводится для мгновенных полей скорости и давления.

Для численного решения используется алгоритм SIMPLE, обеспечивающий сходимость задачи на каждом временном шаге. Для интерполяции давления используется схема PRESTO, для конвективных членов – схема MUSCL 3-го порядка точности.

Область решения задачи включает в себя внутренний объем вихревой камеры, участок подающих трубок и фрагмент атмосферы вблизи выходного отверстия, наличие которого обеспечивает корректное разрешение возвратного течения в приосевой зоне. Расчетная область разбивается на конечные объемы таким образом, что в пристеночной области расположен призматический пограничный слой, а основной объем заполнен многогранниками, средний размер ($V_{\text{ср}}$) которых указан в табл. 2, где также приведено общее число ячеек расчетной сетки. Ячейки наибольших размеров локализованы вблизи границ присоединенного объема атмосферы ввиду того, что течение в дальнем следе истекающей из камеры струи воздуха не является объектом анализа.

Помимо характеристик расчетной сетки в табл. 2, для каждого численного расчета приведены значения максимума диссипации механической энергии (ε_{max}), рассчитанные для внутреннего объема камеры на основании связи тензора напряжений и тензора скоростей деформации [21]. Для полученной величины ε_{max} в соответствии с формулой $l_\varepsilon = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}$ [22], где

Таблица 2

Параметры расчетной сетки и оценка колмогоровского масштаба

Table 2

Grid Parameters and Assessment of the Kolmogorov Length Scale

№	d_o/D	Число ячеек	V_{cp}, M^3	$\varepsilon_{max}, M^2/c^3$	$l_\varepsilon, \mu m$
1	1	$3 \cdot 10^7$	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$1,38 \cdot 10^6$	6,97
2	2	$3,6 \cdot 10^7$	$7,75 \cdot 10^{-10}$	$2,50 \cdot 10^6$	6,01
3	3,43	$4,2 \cdot 10^7$	$8,6 \cdot 10^{-10}$	$0,17 \cdot 10^6$	11,72

кинематическая вязкость воздуха $\nu = 1,484 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, были определены пространственные колмогоровские масштабы (l_ε), величины которых также отражены в табл. 2. Для соотношения наименьших масштабов вихревых структур и шага по сетке в зонах наибольшей диссипации энергии (в торцевых пограничных слоях, где $\Delta x = 10^{-6} \text{ м}$) справедливо выражение $\Delta x \leq l_\varepsilon$, что свидетельствует о достаточном сеточном разрешении колмогоровских масштабов.

Таким образом, численное моделирование закрученного течения в вихревой камере с кольцевой преградой на нижней торцевой стенке может быть проведено с использованием описанных расчетных сеток, а применение уравнений Навье – Стокса без привлечения подсеточных функций и дополнительных допущений является обоснованным. Данный подход может быть классифицирован как подобный прямому численному моделированию.

Результаты численного моделирования

Анализ влияния кольцевой преграды на течение в торцевом пограничном слое проводится путем сравнения с данными о течении в осесимметричной камере с плоской торцевой стенкой [19], т. е. течение в камере без преграды рассматривается как эталонное. Такой подход позволяет установить влияние диаметра препятствия на локальную и общую структуру течения, а также распределение компонент скорости и давления. Для течения в камере без преграды на торцевой стенке известны распределения осевой и окружной компонент скорости в трех поперечных сечениях – $z/H = 0,05; 0,5; 0,95$ [23]. Результаты измерений и численных расчетов полей осевой и тангенциальной компонент скорости представлены на рис. 2.

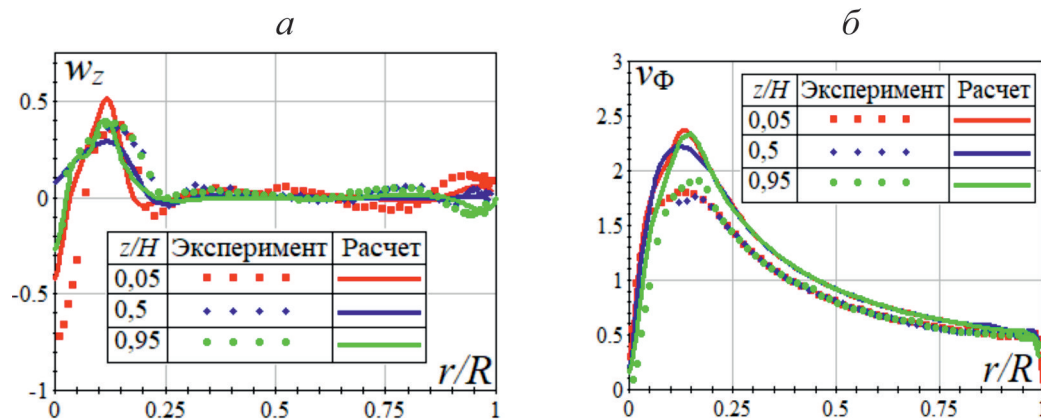


Рис. 2. Изменение осевой (а) и окружной (б) компонент скорости по высоте осесимметричной камеры
Fig. 2. Axial (a) and tangential (b) velocity profiles along the chamber height

Видно, что математическая модель течения и реализованный подход к решению задачи позволяют качественно воспроизвести течение в вихревой камере. Об этом свидетельствует разрешение возвратного течения в осевом направлении (рис. 2, *а*) при $z/H = 0,05$ и $0,95$. Так как сечение $z/H = 0,05$ расположено вблизи нижней торцевой стенки камеры, наблюдаемый максимум скорости $w_z = 0,5$ (при $r/R \sim 0,125$) является проявлением торцевого эффекта, когда под действием несбалансированного радиального градиента давления формируется осевое течение. Исходя из того, что вблизи $r/R \sim 0,125$ по всей высоте камеры сохраняется осевое течение в положительном направлении оси z , торцевой эффект в камере с плоским торцом будет способствовать выносу частиц или примесей из периферии в основной объем и атмосферу. Для окружной скорости (рис. 2, *б*) существенные изменения по высоте камеры отсутствуют, однако в центральном сечении ($z/H = 0,5$) максимум окружной скорости расположен ближе к оси и количественно меньше, чем для течения вблизи торцевых стенок ($z/H = 0,05$ и $0,95$).

Влияние препятствия на течение в основном объеме камеры, представленное на рис. 3, отражает распределения осевой и окружной компонент скорости в сечении $z/H = 0,5$. Для камеры с плоским торцом, как было упомянуто выше, в среднем сечении в приосевой зоне отсутствует движение среды в отрицательном направлении оси Z , что сохраняется и при добавлении преграды на нижней стенке. Добавление преграды диаметром $1D$ приводит к перестройке течения воздуха в осевом направлении: в области $r/R < 0$ возникает локальный максимум скорости, тогда как в области $r/R > 0$ величина w_z ниже, чем в камере с плоской стенкой. На периферии камеры величина осевой скорости немонотонно изменяется, при этом наблюдается чередование зон движения воздуха в отрицательном и положительном направлениях оси Z .

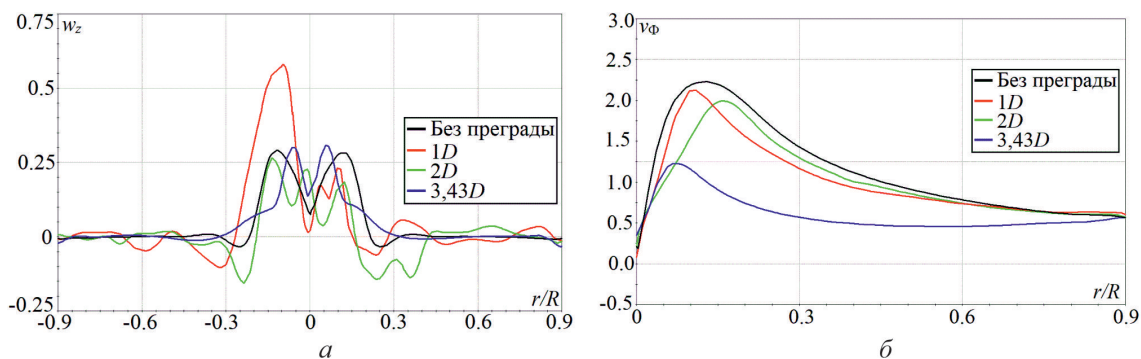


Рис. 3. Распределения осевой (*а*) и окружной скорости в сечении $z/H = 0,5$ (*б*) для камеры с плоской стенкой и с преградами различного диаметра

Fig. 3. Profiles of axial (*a*) and tangential (*б*) velocity in the cross-section at $z/H = 0.5$ for a chamber with a flat wall and with obstructions of various diameters.

При внешнем диаметре препятствия $2D$ локальный максимум также находится в области $r/R < 0$, при $r/R \sim 0$ на распределении возникает локальный экстремум, и в области $r/R > 0$ величина w_z незначительно уменьшается в сравнении с течением в камере с препятствием диаметра $1D$. При этом величина осевой скорости в направлении нижней торцевой стенки при преграде $2D$ выше. Для самой большой по размеру преграды $3,43D$ характер распределения w_z качественно согласуется со случаем течения в камере с плоской торцевой стенкой, однако ширина области с положительной осевой скоростью вблизи оси значительно меньше, снижение скорости до нулевой величины на периферии камеры в данном случае не сопровождается формированием области отрицательной осевой скорости $w_z < 0$.

На распределение окружной скорости преграда оказывает преимущественно количественное влияние (рис. 3, *б*) – вне зависимости от наличия преграды и ее диаметра максимум v_ϕ расположен вблизи оси. Для случаев без преграды и с преградой диаметра $1D$ или $2D$ окруж-

ная скорость на периферии близка к среднерасходной, тогда как при размещении на торцевой стенке преграды диаметром $3,43D$ на участке $0,15 \geq r/R \geq 0,45$ v_ϕ понижается до $0,5$, после чего уже вблизи боковой стенки приближается к среднерасходной величине.

Поля циркуляции в продольном сечении камеры представлены на рис. 4. Максимум величины в каждом случае составляет $\sim 0,7$, что обусловлено идентичными граничными условиями. В камере без преграды (см. левый фрагмент на рис. 4, *а*) вращение среды по закону твердого тела происходит в приосевой области малого радиуса, тогда как в основном объеме распределение циркуляции соответствует зоне свободного вихря. Распределение циркуляции в случае преграды $3,34D$ качественно различается, несмотря на сходные распределения осевой скорости (рис. 3, *а*) – область свободного вихря отсутствует и во всем объеме камеры течение происходит по закону твердого тела, включая и приосевую зону.

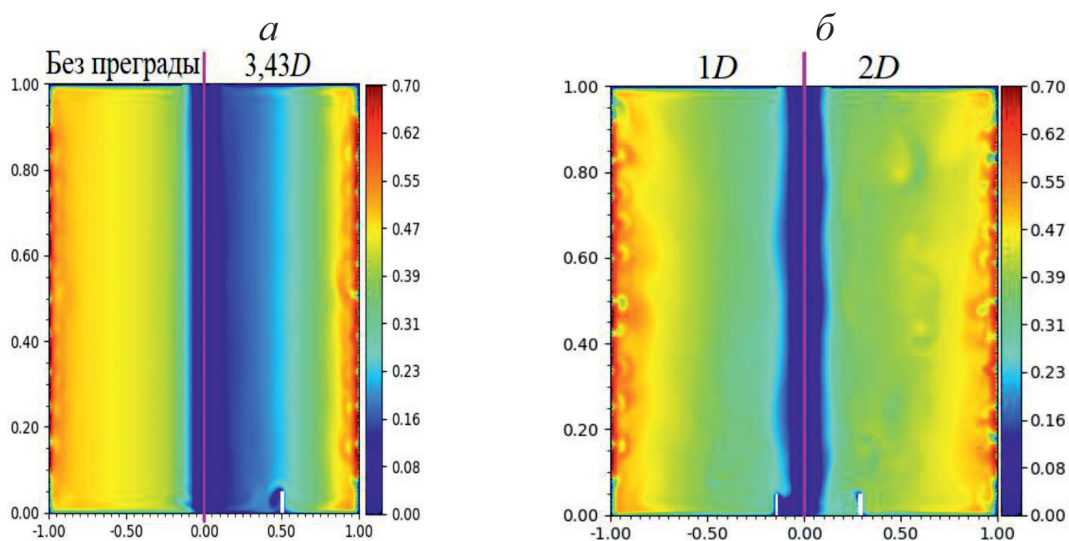


Рис. 4. Поля циркуляции в продольном сечении камеры без преграды и с преградой диаметра $3,43D$ (*а*), с преградами $1D$ и $2D$ (*б*)

Fig. 4. Circulation fields in the longitudinal section of the chamber without an obstruction of diameter $3.43D$ (*a*); with obstructions of $1D$ and $2D$ (*b*)

Для течения в камере с преградой, диаметр которой соответствует диаметру выходного отверстия (см. левый фрагмент на рис. 4, *б*), в приосевой области сохраняется вращение по закону твердого тела, но протяженность зоны свободного вихря сокращается в сравнении с камерой без преграды на нижней стенке (см. левый фрагмент на рис. 4, *а*). Аналогичное течение формируется в камере с кольцевой преградой $2D$, однако размер зоны свободного вихря в данном случае сопоставим с камерой без препятствия на нижней торцевой стенке.

Распределения статического давления и радиального градиента давления вблизи нижней торцевой стенки представлены на рис. 5. Наибольшее разрежение в приосевой области соответствует течению в камере с плоской торцевой стенкой, тогда как размещение преграды приводит к росту давления в данной области. При размещении кольцевых преград величина статического давления вблизи оси камеры отличается незначительно (рис. 6, *а*), тогда как на периферии камеры падение давления при наличии кольца диаметром $3,43D$ составляет порядка 100 Па, что ниже почти в пять раз в сравнении с плоским торцом и в четыре раза в сравнении с преградами $1D$ и $2D$.

Изменение давления и компонент скорости течения в камере с преградой на нижней стенке при условии, что ее высота h остается неизменной, во многом обусловлено радиусом преграды. Преграда на торцевой стенке приводит к торможению течения, которое направлено в радиальном направлении. При натекании на препятствие под действием сил вязкости проис-

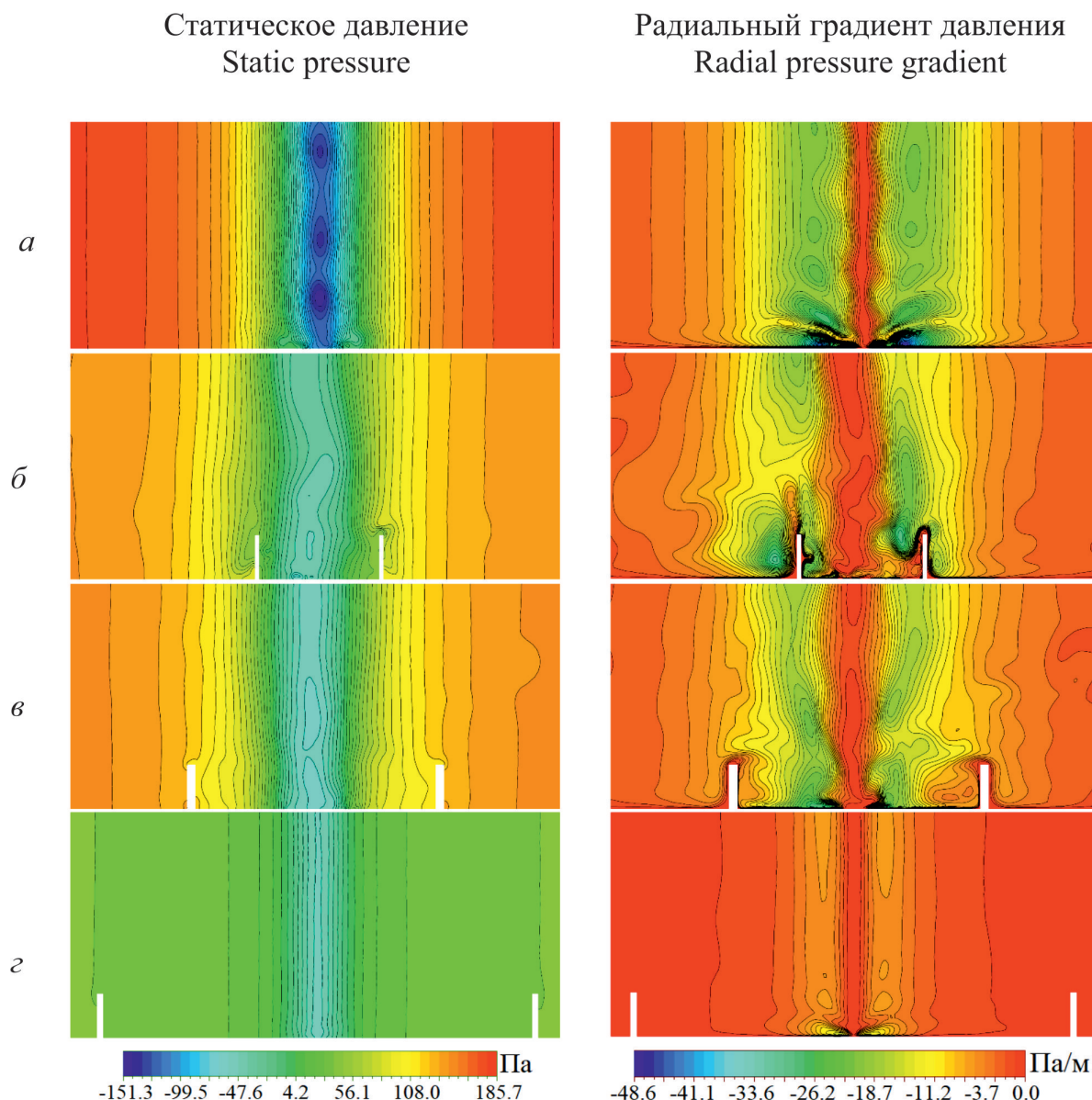


Рис. 5. Поля статического давления и радиального градиента давления вблизи плоской торцевой стенки (*a*) и стенки с препятствиями $1D$ (*б*), $2D$ (*в*) и $3,43D$ (*г*)

Fig. 5. Static pressure and radial pressure gradient fields for different end-wall configurations: (*a*) flat wall, (*б*) wall with $1D$ obstruction, (*в*) with $2D$ obstruction, (*г*) with $3.43D$ obstruction

ходит уменьшение радиальной скорости и, как следствие, ее перераспределение на окружную и осевую составляющие. Искривление изолиний давления вблизи препятствий и распределение радиального градиента давления отчетливо демонстрируют изменение параметров течения вблизи препятствия. Ввиду того, что величина радиальной скорости в пограничном слое увеличивается по мере приближения к оси, преграды $1D$ и $2D$ не оказывают существенного влияния на величину скорости во внутреннем объеме камеры, но приводят к возникновению пульсаций полей скорости и давления, что в свою очередь усиливает и без того нестационарный характер течения с прецессирующим вихревым ядром.

Ввиду того, что течение среды в торцевом пограничном слое происходит с существенно дозвуковой скоростью, то возмущения, формируемые при обтекании кольцевой преграды, рас-

пространяются по всей поверхности вихревой камеры. Данный факт подтверждается распределением статического давления на боковой стенке камеры, построенным на высоте $z/H = 0,05$ (рис. 6, б). На данном графике по оси ординат отложено статическое давление, нормированное на максимальную величину ($P_{st_dim} = P_{st}/P_{st_max}$), что отражает немонотонный характер изменения давления на боковой поверхности камеры.

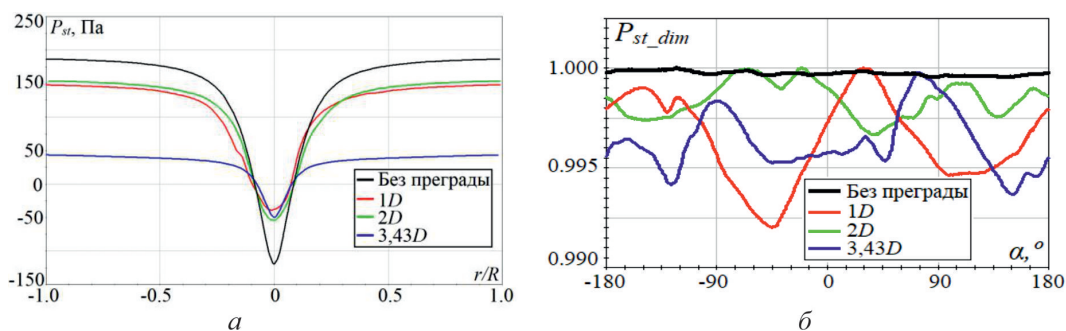


Рис. 6. Распределения статического давления в поперечном сечении $z/H = 0,075$ (а) и на боковой поверхности при $z/H = 0,05$ (б) в камере без преграды и при ее наличии

Fig. 6. Profiles of static pressure in the cross-section at $z/H=0.075$ (a) and on the side surface at $z/H=0.05$ (б) for chambers with and without an obstruction

Схема взаимодействия течения в пограничном слое с кольцевой преградой представлена на рис. 7, где для сравнения в размерных величинах (м/с) представлены поля скорости вблизи препятствий наименьшего и наибольшего диаметров. Из представленных распределений отчетливо видно, что поля течения вблизи препятствий различаются и качественно, и количественно ($\sim$ в 2 раза).

Натекание радиального течения на преграду с внешним диаметром $1D$ сопровождается поворотом потока на 90° , что приводит к формированию локального максимума осевой скорости с внешней стороны (рис. 7, а). В случае внешнего диаметра преграды $3,43D$ радиальное течение безотрывно обтекает кольцевое препятствие, также имеет место поворот потока на 90° , однако существенного прироста скорости с внешней стороны не наблюдается.

В силу различий взаимодействия радиального течения с преградой существенно изменяется положение зон рециркуляции в пограничном слое на нижней торцевой стенке. Так, в области соединения нижней стенки камеры и внешней границы преграды диаметром $1D$ имеет место отрыв потока и возвратное течение; набегающий поток после натекания на преграду также перестраивается, вследствие чего формируется крупная вихревая структура перед препятствием (см. рис. 7, а). При натекании на преграду $3,43D$ зона рециркуляции расположена внутри области, ограниченной кольцевой преградой, также видна точка присоединения в пограничном слое на торцевой стенке.

Процесс вихреобразования, которым сопровождается взаимодействие радиального течения с преградой, является одним из факторов, вызывающих пульсации в ограниченном закрученном течении, которые могут приводить к перестройке потока во всем объеме камеры, что подтверждается изменением вихревой структуры, прецессия которой происходит вблизи оси. На рис. 8 представлены распределения статического давления на диафрагмированном торце камеры ($z/H = 1$), а также изоповерхности давления, позволяющие идентифицировать вихревую структуру в ядре закрученного течения. Так, например, на рис. 8, а видна Y-образная структура, как и в вихревой камере, где на торце размещено препятствие наибольшего диаметра (рис. 8, з), несмотря на существенно менее выраженное разрежение на верхней торцевой стенке. Отличные от Y-образной структуры формируются при размерах препятствия, равных диаметру диафрагмы (D) и $2D$ (рис. 8, б и в соответственно), их форма больше соответству-

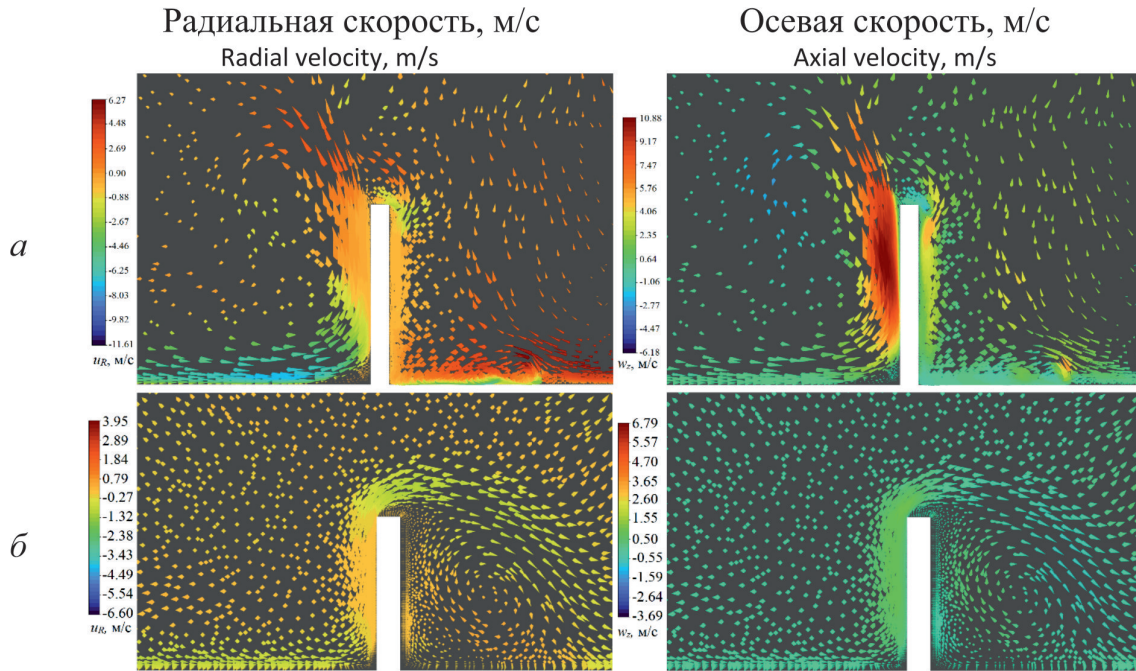


Рис. 7. Поля течения вблизи преграды 1D (а) и 3.43D (б) на нижней торцевой стенке вихревой камеры
 Fig. 7. Flow patterns near the 1D (a) and 3.43D (б) obstructions on the lower end wall of the vortex chamber

ет спиральной. Несмотря на идентичные начальные и граничные условия, структура течения в камере существенно изменяется при размещении препятствия на торцевой стенке. Данный факт согласуется с заключениями авторов [3; 4; 6; 9; 10] о влиянии геометрии дна на структуру течения в тангенциальной вихревой камере.

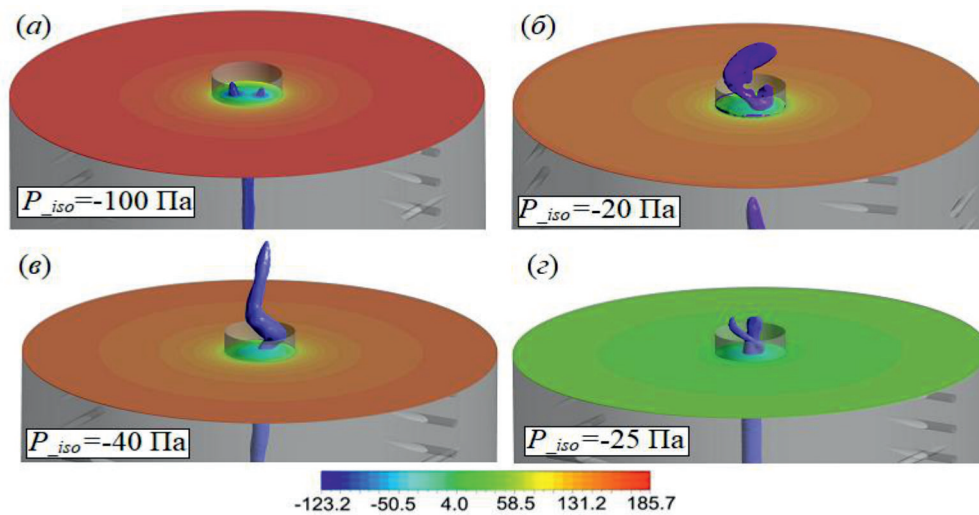


Рис. 8. Распределения статического давления в плоскости $z/H=1$ в камере с плоским торцом (а) и при наличии препятствия 1D (б), 2D (в) и 3.43D (г)
 Fig. 8. Distributions of static pressure in the plane $z/H=1$ for a chamber with (a) a flat end wall, (б) a 1D obstruction, (в) a 2D obstruction, and (г) a 3.43D obstruction

Заключение

Проведен численный анализ полей скорости, циркуляции и давления в вихревой камере при размещении на нижней торцевой стенке кольцевой преграды, характерные размеры которой варьировались. Расчеты проведены для идентичных граничных условий, соответствующих числу Рейнольдса $Re = 3,4 \cdot 10^4$.

Сопоставление результатов численного моделирования с данными о течении в камере идентичной геометрии с плоской торцевой стенкой позволило установить следующее:

1. Размещение препятствия на нижней стенке с диаметром, сопоставимым с размером выходного отверстия, приводит к изменению сопротивления вихревой камеры и является дополнительным источником пульсаций скорости и давления во внутреннем ее объеме.

2. Размещение на нижней стенке препятствия размером $2D$ дает результаты, близкие к случаю преграды малого размера, отмеченного выше. Кроме того, увеличение внешнего диаметра препятствия в два раза практически не приводит к изменениям величины давления в камере. Прецессирующая структура вблизи выходного отверстия также имеет спиральную форму, как и при преграде $1D$.

3. Подавление торцевого эффекта наблюдается при размещении на нижней стенке препятствия наибольшего диаметра, что сопровождается понижением давления, окружной скорости и уменьшением коэффициента гидравлических потерь.

Список литературы

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
2. Seibold F., Ligrani P., Weigand B. Flow and heat transfer in swirl tubes – A review // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 187. P. 122455-1–122455-26.
3. Смульский И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука, 1992. 301 с.
4. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Москва; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2019. 504 с.
5. Касим М. Н. Экспериментальное исследование массообменных характеристик вихревых распыливающих массообменных аппаратов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 70, № 7. С. 46–50.
6. Гольдштик М. А., Сорокин В. Н. О движении частицы в вихревой камере // *Прикладная механика и техническая физика*. 1986. № 6. С. 149–152.
7. Kotas T. J. Turbulent boundary layer flow on the end wall of a cylindrical vortex chamber // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*. 1975. Vol. 189. No. 1. P. 305–315.
8. Volchikov E. P., Semenov S. V., Terekov V. I. Heat Transfer and Shear Stress at the End Wall of Vortex Chamber // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1991. Vol. 4. P. 546–557.
9. Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое // *Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе*. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2005. 358 с.
10. Гольдштик М. А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука. 1981. 366 с.
11. Сорокин В. В. Несжимаемое течение в короткой вихревой камере с гиперболическими стенками // *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. Т. 12, № 4. С. 615–622.
12. Feng M., Gui C., Zhou Y., Lei Z. Numerical study on performance optimization and flow mechanism of a new cyclone separator // *Green Chemical Engineering*. 2025. Vol. 6. No. 1. P. 76–84. DOI 10.1016/j.gce.2024.03.006
13. Zhang Y., Li K., Zhang K., Zhu G., Sun Z., Shi J. Research on the Flow Field Characteristics of the Industrial Elliptical Cyclone Separator // *Separations*. 2025. Vol. 12. No. 50. DOI 10.3390/separations12020050

14. **Escudier M. P.** Observations of the flow produced in a cylindrical container by a rotating end wall // *Experiments in Fluids*. 1984. Vol. 2. P. 189–196.
15. **Valentine D. T., Jahnke C. C.** Flows induced in a cylinder with both end walls rotating // *Physics of Fluids*. 1994. Vol. 6. No. 8. P. 2702–2710.
16. **Piva M., Meiburg E.** Steady axisymmetric flow in an open cylindrical container with a partially rotating bottom wall // *Physics of Fluids*. 2005. Vol. 17. P. 063603-1–063603-12.
17. **Hyder S. H., Shtern V., Fazle H.** Control of vortex breakdown by addition of near-axis swirl // *Physics of Fluids*. 2003. Vol. 15. No. 2. P. 271–279.
18. **Yu P., Lee T. S., Zeng Y., Low H. T.** Characterization of flow behavior in an enclosed cylinder with a partially rotating end wall // *Physics of Fluids*. 2007. Vol. 19. No. 5. Article 057104.
19. **Семенов С. В.** Аэродинамика и теплообмен в торцевом пограничном слое вихревой камеры: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Новосибирск, 1987. 182 с.
20. **Кудрявцев В. М., Васильев А. П., Кузнецов В. А.** Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. М.: Высш. шк., 1983. 703 с.
21. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1978. 736 с.
22. **Pope S. B.** *Turbulent Flows*. Cambridge University Press. 2000. 807 p.
23. **Скибина Н. П., Терехов В. В., Терехов В. И.** Сравнительный анализ структуры течения в осесимметричной вихревой камере с использованием URANS-подхода и прямого численного моделирования // *Теплофизика и аэромеханика*. 2025. Т. 32, №5. С. 957–972.

References

1. **Gupta A. K., Lilley D.G., Syred N.** *Swirl flows*. Tunbridge Wells, Kent: Abacus Press, 1984. 475 p.
2. **Seibold F., Ligrani P., Weigand B.** Flow and heat transfer in swirl tubes – A review. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 187, pp. 122455-1–122455-26.
3. **Smulskiy I. I.** *Aerodynamics and Processes in Vortex Chambers*. Novosibirsk, Nauka publ., 1992. 301 p.
4. **Alekseenko S. V., Kuibin P. A., Okulov V. L.** *Introduction to theory of concentrated vortices*. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Science, 2019. 504 p.
5. **Kasim M. N.** Experimental study of mass transfer characteristics of vortex spraying mass transfer apparatus. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, vol. 70, no. 7, pp. 46–50.
6. **Goldshtik M. A., Sorokin V. N.** On the motion of a particle in a vortex chamber. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1986, vol. 1, no. 6, pp. 149–152.
7. **Kotas T. J.** Turbulent boundary layer flow on the end wall of a cylindrical vortex chamber. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, 1975, vol. 189, no. 1, pp. 305–315.
8. **Volchkov E. P., Semenov S. V., Terekov V. I.** Heat Transfer and Shear Stress at the End Wall of Vortex Chamber. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1991, vol. 4, pp. 546–557.
9. **Goldshtik M. A.** Transport phenomena in a granular layer. *Rus. acad. of sciences, Siberian Branch, Kutateladze Institute of Thermophysics*. Novosibirsk: Institute of Thermophysics SB RAS, 2005. 358 p.
10. **Goldshtik M. A.** *Vortex Flows*. Novosibirsk: Nauka publ., 1981. 366 p.
11. **Sorokin V. V.** Incompressible flow in a short vortex chamber with hyperbolic walls. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2005, vol. 12, no. 4, pp. 615–622.
12. **Feng M., Gui C., Zhou Y., Lei Z.** Numerical study on performance optimization and flow mechanism of a new cyclone separator. *Green Chemical Engineering*, 2025, vol. 6, no. 1, pp. 76–84. DOI 10.1016/j.gce.2024.03.006
13. **Zhang Y., Li K., Zhang K., Zhu G., Sun Z., Shi J.** Research on the Flow Field Characteristics of the Industrial Elliptical Cyclone Separator. *Separations*, 2025, vol. 12, no. 50. DOI: 10.3390/separations12020050.

14. **Escudier M. P.** Observations of the flow produced in a cylindrical container by a rotating end wall. *Experiments in Fluids*, 1984, vol. 2, pp.189–196.
15. **Valentine D. T., Jahnke C. C.** Flows induced in a cylinder with both end walls rotating. *Physics of Fluids*, 1994, vol. 6, no. 8, pp. 2702–2710.
16. **Piva. M., Meiburg E.** Steady axisymmetric flow in an open cylindrical container with a partially rotating bottom wall. *Physics of Fluids*, 2005, vol. 17, pp. 063603-1–063603-12.
17. **Hyder S. H., Shtern V., Fazole H.** Control of vortex breakdown by addition of near-axis swirl. *Physics of Fluids*, 2003, vol. 15, no. 2, pp. 271–279.
18. **Yu P., Lee T. S., Zeng Y., Low H. T.** Characterization of flow behavior in an enclosed cylinder with a partially rotating end wall. *Physics of Fluids*, 2007, vol. 19, no. 5. Article 057104.
19. **Semenov S. V.** Aerodynamics and heat transfer in the end-wall boundary layer of a vortex chamber (Candidate of Technical Sciences). Novosibirsk, 1987.
20. **Kudryavtsev V. M., Vasiliev A. P., Kuznetsov V. A.** Fundamentals of the Theory and Calculation of Liquid Rocket Engines. Moscow, Vysshaya Shkola, 1983. 703 p.
21. **Loitsyansky L. G.** Fluid and Gas Mechanics. Moscow, Nauka publ., 1978. 736 p.
22. **Pope S. B.** Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000. 807 p.
23. **Skibina N. P., Terekhov V. V., Terekhov V. I.** Comparative analysis of flow structure in an axisymmetric vortex chamber using the URANS approach and DNS. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2025, vol. 32, no. 5, pp. 957–973.

Сведения об авторах

Скибина Надежда Петровна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

Терехов Владимир Викторович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник

Терехов Виктор Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник

Information about the Authors

Nadezhda P. Skibina, Candidate of Physical and Mathematical Science, Researcher

Vladimir V. Terekhov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, Leading Researcher

Viktor I. Terekhov, Doctor of Science (Engineering), Principal Researcher

Статья поступила в редакцию 24.11.2025;

одобрена после рецензирования 29.11.2025; принята к публикации 12.12.2025

The article was submitted 24.11.2025;

approved after reviewing 29.11.2025; accepted for publication 12.12.2025