

DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-14



Особенности топологии ближнего следа аэровзвеси за телами простой формы

А.А. Чернова, ORCID 0000-0001-8579-6279 <alicaaa@gmail.com>

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова,
Россия, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.*

Аннотация. Исследуется процесс нестационарного дозвукового ламинарного обтекания тел простой формы двухфазным потоком аэровзвеси (объемная доля воды в аэровзвеси составляет 1%). Поставленная задача может быть описана системой уравнений Навье-Стокса с дополнением как уравнений концентрации и соответствующих фазам аэровзвеси уравнений состояния, так и слагаемых, обеспечивающих учет межфазного взаимодействия жидких частиц со спутным потоком воздуха и обтекаемым телом. Решение строится в рамках подхода Эйлера на основе библиотеки multiphaseEulerFoam пакета OpenFoam. Приводятся и анализируются поля распределения физических величин (давление, скорость, концентрация) в фиксированные моменты времени. В результате исследования выявлено и показано, что структура течения аэровзвеси вблизи обтекаемого тела (до и после), характеризуется формированием области торможения потока вблизи тела, областями локального изменения параметров потока по боковой границе обтекаемого тела и формированием области пониженного давления и вихреобразования за телом. Выявлены и показаны особенности формирования и развития (в том числе топологические особенности) течений в ближнем следе. Показано, что форма тела оказывает существенное влияние на физические параметры потока вблизи обтекаемого тела, оценены перепады давления в области торможения и в области разряжения течения за обтекаемым телом, а также длин области торможения и ближнего следа. Отмечено, что вихревой след за телом, преимущественно, заполнен воздушной фазой аэровзвеси. Показано, что наличие частиц воды приводит к расширению границ вихревых течений за телом, в том числе к некоторому увеличению амплитуд пульсаций вихревых структур. Оценка влияния силы тяжести на течение аэровзвеси вблизи обтекаемого тела и в ближнем следе показала необходимость ее учета.

Ключевые слова: численное моделирование; аэрогидродинамика; аэровзвесь; обтекание тел простой формы; ближний след.

Для цитирования: Чернова А.А. Особенности топологии ближнего следа аэровзвеси за телами простой формы. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 3, часть 1, 2026 г., стр. 223–240. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-14.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-21-00067.

Features of the Near-Wake Topology of Aerosol Particles behind Simple-Shaped Bodies

A.A. Chernova, ORCID: 0000-0001-8579-6279 <alicaaa@gmail.com>

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
7, Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation.*

Abstract. The process of unsteady subsonic laminar flow around bodies of simple shape by a two-phase flow of air suspension (the volume fraction of water in the air suspension is 1%) is investigated. The problem can be described by a system of Navier-Stokes equations with the addition of both the concentration equations and the equations of state corresponding to the phases of the air suspension, as well as terms that take into account the interphase interaction of liquid particles with the satellite air flow and a streamlined body. The solution is based on the Euler approach based on the multiphaseEulerFoam library of the OpenFOAM package. The fields of distribution of physical quantities (pressure, velocity, concentration) at fixed time points are presented and analyzed. As a result of the study, it was revealed and shown that the structure of the air suspension flow near the streamlined body (before and after) is characterized by the formation of an area of flow deceleration near the body, areas of local changes in flow parameters along the lateral boundary of the streamlined body and the formation of an area of low pressure and vortex formation behind the body. The features of the formation and development (including topological features) of currents in the near wake are identified and shown. It is shown that the shape of the body has a significant effect on the physical parameters of the flow near the streamlined body, pressure differences in the braking area and in the discharge area of the flow behind the streamlined body, as well as the lengths of the braking area and the near track are estimated. It is noted that the vortex wake of the body is mainly filled with the air phase of the air suspension. It is shown that the presence of water particles leads to an expansion of the boundaries of vortex flows behind the body, including a slight increase in the amplitude of pulsations of vortex structures. An assessment of the effect of gravity on the flow of air suspension near a streamlined body and in the near wake showed the need to take it into account.

Keywords: numerical modeling; aerohydrodynamics; aerosol; flow around simple-shaped bodies; near wake.

For citation: Chernova A.A. Features of the near-wake topology of aerosol particles behind simple-shaped bodies. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 38, issue 3, part 1, 2026, pp. 223-240 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-14.

Acknowledgements: The study was funded by the Russian Science Foundation № 25-21-00067.

1. Введение

Одним из разделов современной механики жидкости и газа является механика неоднородных сред. В случае если компоненты таких сред имеют различное агрегатное состояние, то такие среды называют многофазными. В настоящее время активно исследуются вопросы механики многофазных сред применительно к объектам энергетики, машиностроения и ракетной техники (течения в соплах). Можно выделить ряд классических фундаментальных работ [1-10], посвященных вопросам общей теории гидродинамики многофазных сред. Так в работах [1-5] впервые приведены математические основы вычислительной и теоретической динамики многофазных сред. В работе [6] рассматриваются вопросы применения математического аппарата многофазных сред для исследования неравновесных процессов в соплах. Работы [7-10] посвящены вопросам учета влияния многофазности на сопряженные процессы в многофазных средах, содержащих порошковые включения. В работе [8] представлен обзор теоретических и экспериментальных работ по изучению влияния дисперсных частиц на динамику турбулентного потока газа. Вопросы численного моделирования динамики газовзвесей исследованы в работах [11-19]. Вопросы исследования области применимости моделей реальных сред к многофазным потокам рассмотрены в работах [12-13], а вопросы численного моделирования волновых процессов многофазных систем рассмотрены в [16-17]. Исследованию влияния динамики твердых гетерогенных, по отношению к несущему потоку, частиц на динамику, в том числе и турбулизацию, несущего

потока рассмотрены в [12]. Вопросы численного моделирования особенностей взаимодействия газовой фазы с твердыми частицами в процессах напыления и осаждения твердой фазы исследованы в работах [13-15]. Согласно работе [20] одной из важных проблем механики многофазных сред остается адекватное определение их свойств (вязкость, диффузия, теплопроводность и т.д.). В частности показано, что до настоящего момента времени существует два подхода: экспериментальный и теоретический, основанный на кинетической теории газов. В работе [21] представлен обзор теоретических и экспериментальных работ по изучению влияния дисперсных частиц на динамику турбулентного потока газа. Обзор результатов работ в области механики многофазных потоков, выполненных коллективами МФТИ и ЦАГИ, представлен в работе [22]. В частности, в [22] показано, что развитие получили такие направления механики многофазных сред, как динамика отдельной частицы в несущем газе, механика и динамика соударения частицы с твердым телом, газотермодинамика и кинетика полидисперсного турбулентного потока; акустика газодисперсной смеси, оптика и электрофизика газодисперсного потока. Также развитие получили направления механики и динамики многофазных сред, связанные с задачами старта и входа в запыленную атмосферу ракет, с исследованиями обледенения летательного аппарата и с изучением двухфазных струй в разреженном пространстве. Работа [23] рассматривает новую модель движения тепловой гетерогенной струи, которая взаимодействует с внешним закрученным потоком. Вопросы численного моделирования процесса распространения ударных волн в газозвеси на основе модели вязкого теплопроводного газа рассмотрены в [17].

Несмотря на значительное число работ в области моделирования механики и динамики многофазных сред, вопросы учета особенностей многофазного потока в аэродинамике ближнего следа, исходя из анализа существующих работ [24-28], остаются открытыми. Вследствие чего настоящая работа направлена как изучение особенностей многофазной аэродинамики, а именно на исследование топологических особенностей ближнего следа за телами простой формы при обтекании их дозвуковым двухфазным потоком.

2. Постановка задачи

Рассматривается пространственная задача об обтекании потоком двухфазной среды (аэровзвесью с объемным содержанием воды -1% (вода содержится в форме капель диаметром 1 мм)). Расчетная область представляет собой параллелепипед (рис. 1) с размерами 5x1x1 м. Формы рассматриваемых обтекаемых тел с характерным размером (гидравлический диаметр) 0,2 м представлены на рис. 2. Тела расположены на расстоянии 1,4 м от левой границы расчетной области (границы «Inlet», рис. 1) и на равном удалении от боковых, верхней и нижней границ параллелепипеда.



Рис. 1. Обобщенная расчетная область.
Fig. 1. Generalized calculation area.

Физические свойства компонентов аэровзвеси представлены в табл. 1, поверхностное натяжение на межфазной границе: $\sigma = 0.0728$ Н/м.

При построении математической модели динамики многофазного потока в качестве допущений принято, что рассматривается изотермическое течение нереагирующих фаз

аэрозвеси; обтекаемые тела являются абсолютно гладкими. Действие силы тяжести не учитывается, оценка корректности данного допущения приведена п. 3.2 данной статьи.

Табл. 1. Физические свойства фаз аэрозвеси.
Table 1. Physical properties of aerosol phases.

Среда	ν , м ² /с	ρ , кг/м ³	C_p , Дж/кгК	d_w , м
Вода	$1 \cdot 10^{-6}$	1000	4195	0.001
Воздух	$1.48 \cdot 10^{-5}$	1	1007	-

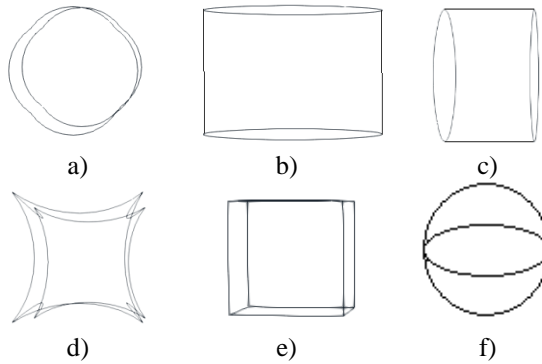


Рис. 2. Формы обтекаемых тел: а) – с) цилиндр с нетривиальной формой поперечного сечения различной пространственной ориентации; d) вогнутый шестигранник; е) куб; f) сфера.
Fig. 2. Forms of streamlined bodies: a) – c) cylinder with a non-trivial cross-section shape and various spatial orientations; d) concave hexagon; e) cube; f) sphere.

С учетом сделанных допущений для описания динамики двухфазной среды будет использоваться подход Эйлер-Эйлера [29-33], тогда нестационарная динамика двухфазного потока может быть описана системой уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial t} A + \frac{\partial}{\partial x} B + \frac{\partial}{\partial y} C + \frac{\partial}{\partial z} D = F,$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 \\ u_k \\ v_k \\ w_k \\ e_k \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} u_k \\ u_k^2 \\ u_k v_k \\ u_k w_k \\ u_k e_k \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} v_k \\ u_k v_k \\ v_k^2 \\ v_k w_k \\ v_k e_k \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} w_k \\ u_k w_k \\ v_k w_k \\ w_k^2 \\ w_k e_k \end{pmatrix},$$

$$F = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\rho_k} \sum_{j=1}^N J_{ji} \\ -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p}{\partial x} + v_k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_k + \frac{1}{\rho_k} \sum_{j=1}^N (\mathbf{P}_{ji} - J_{ji} u_k) \\ -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p}{\partial y} + v_k \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_k + \frac{1}{\rho_k} \sum_{j=1}^N (\mathbf{P}_{ji} - J_{ji} v_k) \\ -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p}{\partial z} + v_k \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_k + \frac{1}{\rho_k} \sum_{j=1}^N (\mathbf{P}_{ji} - J_{ji} w_k) \\ A_i + Q_i + \frac{1}{\rho_k} \sum_{j=1}^N J_{ji} (e_{ji} + e_i) + f_k \mathbf{V}_k \end{array} \right. \quad (1)$$

где действие поверхностных сил определяется тензором напряжений, действие массовых сил определяется гравитационными силами, а взаимодействие гетерогенных включений аэровзвеси между собой и с несущей фазой определяется интенсивностью обмена импульсом между фазами \mathbf{P}_{jk} и интенсивностью массообмена между включениями и несущим потоком J_{jk} ; ρ_k - плотность k -ой фазы; p - давление; u, v, w - компоненты вектора скорости; e_k - полная энергия единицы массы k -ой фазы; f_k - массовая сила, действующая на частицы k -ой фазы; E_{jk} - интенсивность обмена энергией между фазами; $\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu\dot{\mathbf{S}}$ - тензор напряжений; \mathbf{q}_k - тепловой поток k -ой фазы; μ_k - динамический коэффициент вязкости k -ой фазы. Индекс k принимает значение “w” для воды и “a” для воздуха.

Граничные условия для системы уравнений (1) определены следующим образом:

- на внешних границах расчетной области использовалось условие проскальзывания;
- на входной (левой) границе расчетной области определена ударная конфигурация профиля скорости ($u = 5$ м/с, $v = w = 0$ м/с) и концентрации фаз (99% воздуха и 1% воды);
- на выходной границе использовались неотражающие граничные условия;
- на непроницаемых границах обтекаемых тел были заданы условия непротекания и прилипания.

Число Рейнольдса составляет 67570, система уравнений (1) решается в полной постановке, без осреднения в рамках квази DNS подхода. Необходимо отметить, что число Вебера для данных условий движения двухфазной среды достигает значения $We = 343$, что говорит о потенциальной возможности дробления капель жидкости.

Приближенное решение полученной системы уравнений в частных производных строится методом конечных объемов по пространству и методом Эйлера по времени на основе модуля multiphaseEulerFoam, входящего в состав OpenFOAM. Шаг по времени выбирался из условия ограничения максимального числа Куранта ($Co \leq 0.5$), начальный шаг по времени определен как $\Delta t = 0.0001$ с.

Дискретизация конвективных слагаемых по пространству производится схемой Ван Лира второго порядка точности. Реконструкция потоков на гранях ячеек производится с использованием схемы TVD с ограничением градиентов [30], в качестве ограничителя используется функция Ван Лира minmod [34].

Дискретизация расчетной области по пространству производилась с помощью шестигранных элементов, размеры которых варьировались в диапазоне от 10^{-4} м до $2.5 \cdot 10^{-3}$ м, общее количество которых составляло 15760000, в направлении обтекаемого тела (до, после и вокруг тела) использовалось сгущение сетки). Результаты исследования сеточной сходимости представлены на рис. 3.

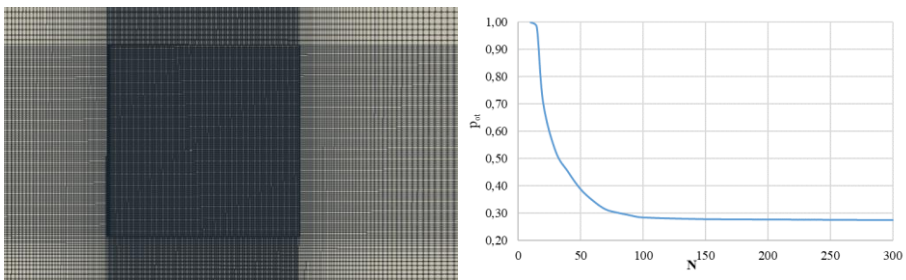


Рис. 3. Сеточная сходимость: p_{rel} - относительное давление в точке торможения, N - количество ячеек на границе препятствия.

Fig. 3. Calculation grid near the obstacle and the graph of grid convergence, where p_{rel} is the relative pressure at the breaking point, N is the number of cells at the boundary of the obstacle.

Выявленное оптимальное количество сеточных элементов на границе препятствия было преобразовано в отношение эквивалентного диаметра обтекаемого тела к числу элементов $N_d = d_e/500$, данный критерий рекомендован в качестве оценки необходимого сеточного разрешения. Предложен критерий для оценки необходимого сеточного разрешения для задач аэродинамики ближнего следа:

$$\frac{1}{N_d} \leq \frac{c_d}{CoF \cdot We_p} \quad (2)$$

Результаты тестирования расчетных схем, алгоритмов и используемого подхода представлены в работах [35,36]. Валидация математической модели и используемых численных методов проводилась на задаче об обтекании двухфазным потоком аэрозвеси куба, расположенного на непроницаемой поверхности. Топологические особенности потока сопоставлялись с результатами численно-экспериментальных исследований [37].

Структура двухфазного потока аэрозвеси характеризуется образованием области торможения вблизи лобовой поверхности обтекаемого тела, формированием вихревого следа, прикрепленного к верхней острой кромке лобовой поверхности препятствия и распространяющегося в плоскости верхней границы тела. На рис. 4 представлены линии тока вблизи куба.

Из рис. 4 видно, что структура потока двухфазной среды качественно соответствует известным расчетным и экспериментальным данным, полученным для однофазного аэродинамического обтекания куба, стоящего на непроницаемой поверхности. В частности, можно отметить образование вблизи нижней непроницаемой границы перед обтекаемым кубом возвратного течения и, как следствие, разделение потока перед обтекаемым телом. Также по форме, размерам и характеру согласуются как вихревая структура, покрывающая верхнюю грань куба, так и обратное течение, формируемое за обтекаемым телом, в области пониженного давления. Удовлетворительное согласование расчетных данных, полученных для однопроцентной аэрозвеси в плоской постановке с использованием предложенного подхода, с известными расчетными и экспериментальными данными, полученными для однофазного потока, подтверждает корректность математических моделей, а также используемых схем и алгоритмов.

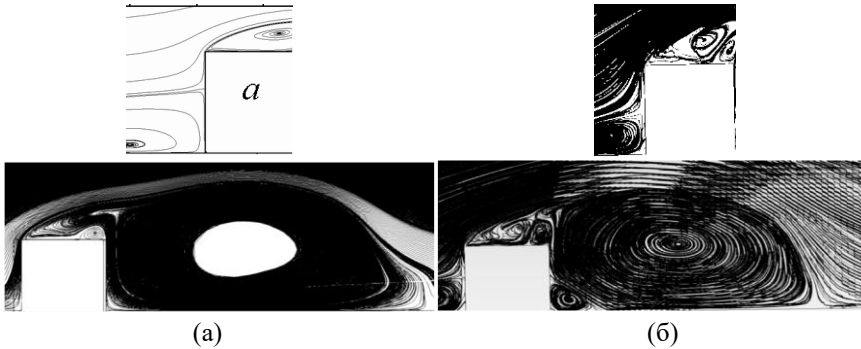


Рис. 4. Линии тока вблизи обтекаемого куба: а) численное и экспериментальное моделирование динамики однофазного потока [37]; б) численное моделирование динамики аэрозвеси.

Fig. 4. Streamlines near a streamlined cube: a) numerical and experimental modeling of the dynamics of a single-phase flow [37]; b) numerical modeling of the dynamics of air suspension.

3. Анализ результатов численного моделирования

Структура течения аэрозвеси вблизи обтекаемого тела, в общем случае (рис. 5) характеризуется формированием области торможения потока перед телом, областей локального изменения параметров потока по боковой границе обтекаемого тела и области

пониженного давления и вихреобразования за телом. Однако, как видно из рис. 6, размеры данных областей определяются геометрией обтекаемого тела.

Из рис. 5 и табл. 2 видно, что форма обтекаемого тела существенно влияет как на среднее значение избыточного давления (p_s), на реализуемый перепад давления в области торможения ($\beta = p_{max}/p_{in}$), длину области торможения (L_t), так и на степень понижения давления ($\varepsilon = p_{in}/p_{min}$) в области за обтекаемым телом (то есть на давление в ближнем аэродинамическом следе).

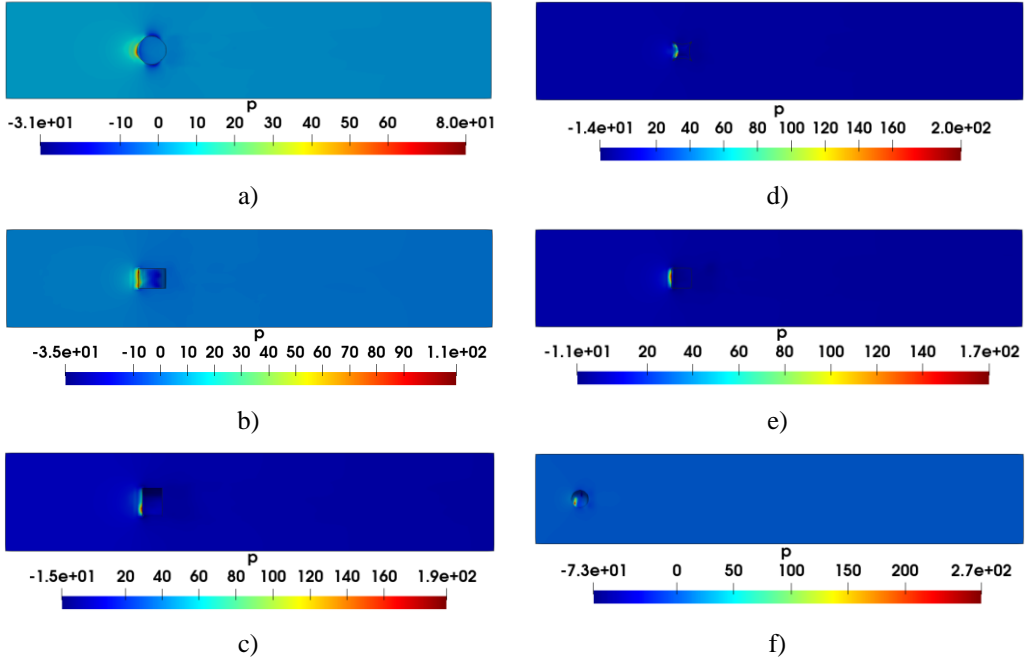


Рис. 5. Распределение избыточного давления в продольном сечении расчетной области, $t = 10$ с, при обтекании двухфазным потоком: а) цилиндра, ориентированного в направлении z ; б) цилиндра, ориентированного в направлении y ; в) цилиндра, ориентированного в направлении x ; д) вогнутого шестигранника; е) куба; ф) сферы.

Fig. 5. Distribution of overpressure in the longitudinal section of the computational domain, $t = 10$ s, when a two-phase flow flows around: a) a cylinder oriented in the z direction; b) a cylinder oriented in the y direction; c) a cylinder oriented in the x direction; d) a concave hexagon; e) a cube; f) a sphere.

Табл.2. Локальные характеристики течения вблизи обтекаемого тела.
Table 2. Local characteristics of the flow near a streamlined body.

Параметр	Форма обтекаемого тела					
	Цилиндр по z (рис. 2а)	Цилиндр по y (рис.2б)	Цилиндр по x (рис. 2с)	Вогнутый шестигранник (рис. 2д)	Куб (рис. 2е)	Сфера (рис. 2ф)
$p_s, \text{Па}$	1,56	1,724	3,235	3,496	2,717	0,4282
β	18,598	19,755	13,06	6,508	39,97	14,88
ε	-1,98	-2,125	-4,61	-2,22	-3,46	-0,165
$L_t, \text{м}$	0,795	0,8963	0,955	0,92	0,83	0,374
$L_s, \text{м}$	0,175	0,1996	0,43	0,125	0,34	0,374
CoF	1,472	1,5286	1,5466	1,6012	1,0071	1,576

На рис. 6 приведены поля модуля скорости в продольном сечении расчетной области для всех рассматриваемых обтекаемых тел. Видно, что форма и характеристики вихревого следа, как

и геометрия области торможения, определяются именно геометрией обтекаемого тела. Например, область торможения вблизи цилиндра, ориентированного по оси x , имеет полусферическую форму с линейными размерами в 1,2 раза превышающими аналогичные области для цилиндров с ориентацией по осям y и z , а ближний аэродинамический след за таким цилиндром (Ls, табл. 2) имеет максимальную длину. Необходимо отметить, что в данной статье под ближним аэродинамическим следом понимается участок вихревого следа, включающий первичные возвратные вихревые структуры, характеризующийся как понижением давления (отрицательное избыточное давление), так и локальным изменением направления вектора скорости потока.

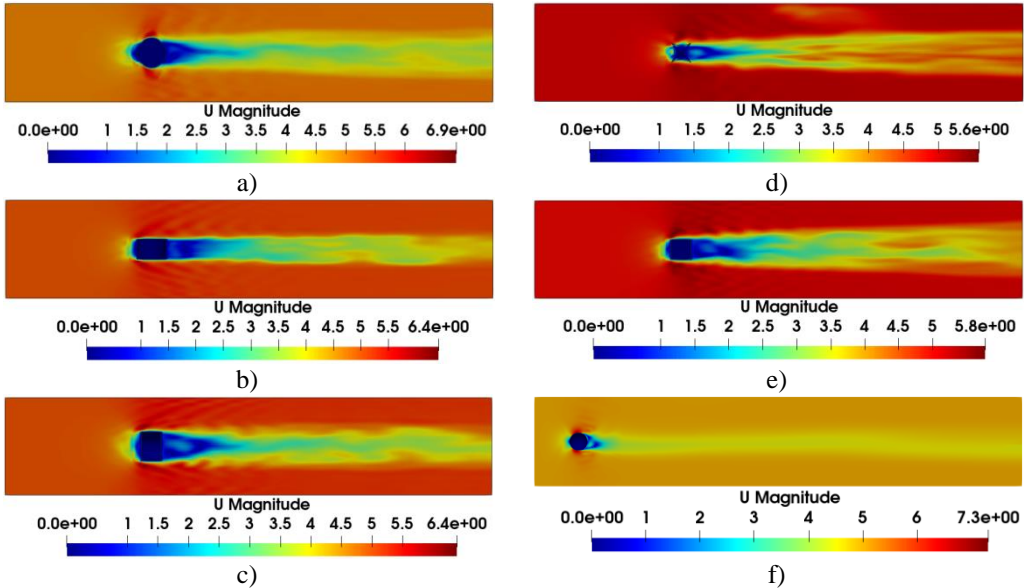


Рис. 6. Поле модуля скорости аэрозоль в продольном сечении расчетной области, $t = 10$ с, при обтекании двухфазным потоком: а) цилиндра, ориентированного в направлении z ; б) цилиндра, ориентированного в направлении y ; в) цилиндра, ориентированного в направлении x ; д) вогнутого шестигранника; е) куба; ф) сферы.

Fig.6. The velocity module field of the aerosol in the longitudinal section of the computational domain, $t = 10$ s, when the two-phase flow flows around: a) a cylinder oriented in the z direction; b) a cylinder oriented in the y direction; c) a cylinder oriented in the x direction; d) a concave hexagon; e) a cube; f) a sphere.

Наибольший интерес представляет распределение фаз аэрозоль – воздуха и воды (рис. 7) в ближнем следе, а также влияние формы обтекаемого тела на коэффициент гомогенизации. Коэффициент гомогенизации (однородности), построен на основе стандартного коэффициента отклонения, $CoF = \sqrt{\frac{1}{j-1} \cdot \sum_{j=1}^j (\alpha_j - \bar{\alpha})^2} \cdot \frac{1}{\bar{\alpha}}$, где J – количество расчетных ячеек в сечении, α_j и $\bar{\alpha}$ – локальное и осредненное по сечению значения объемной доли компонента. Оценка коэффициента гомогенизации производится в поперечном сечении на расстоянии 0,1 м от обтекаемого тела (табл. 2).

Из рис. 7 видно, что аэродинамический след за телом, преимущественно, заполнен газом, однако в ближнем следе, например, за цилиндрами (рис. 7, а-с) встречаются включения водной фазы различного размера. Необходимо отметить, что вследствие не учета действия силы тяжести, дисперсные частицы воды, преимущественно, концентрируются вблизи области торможения потока – на лобовой поверхности обтекаемого тела.

Дальнейший анализ особенностей ближнего аэродинамического следа аэрозоль, за исследуемыми телами, требует исследования топологических особенностей потока.

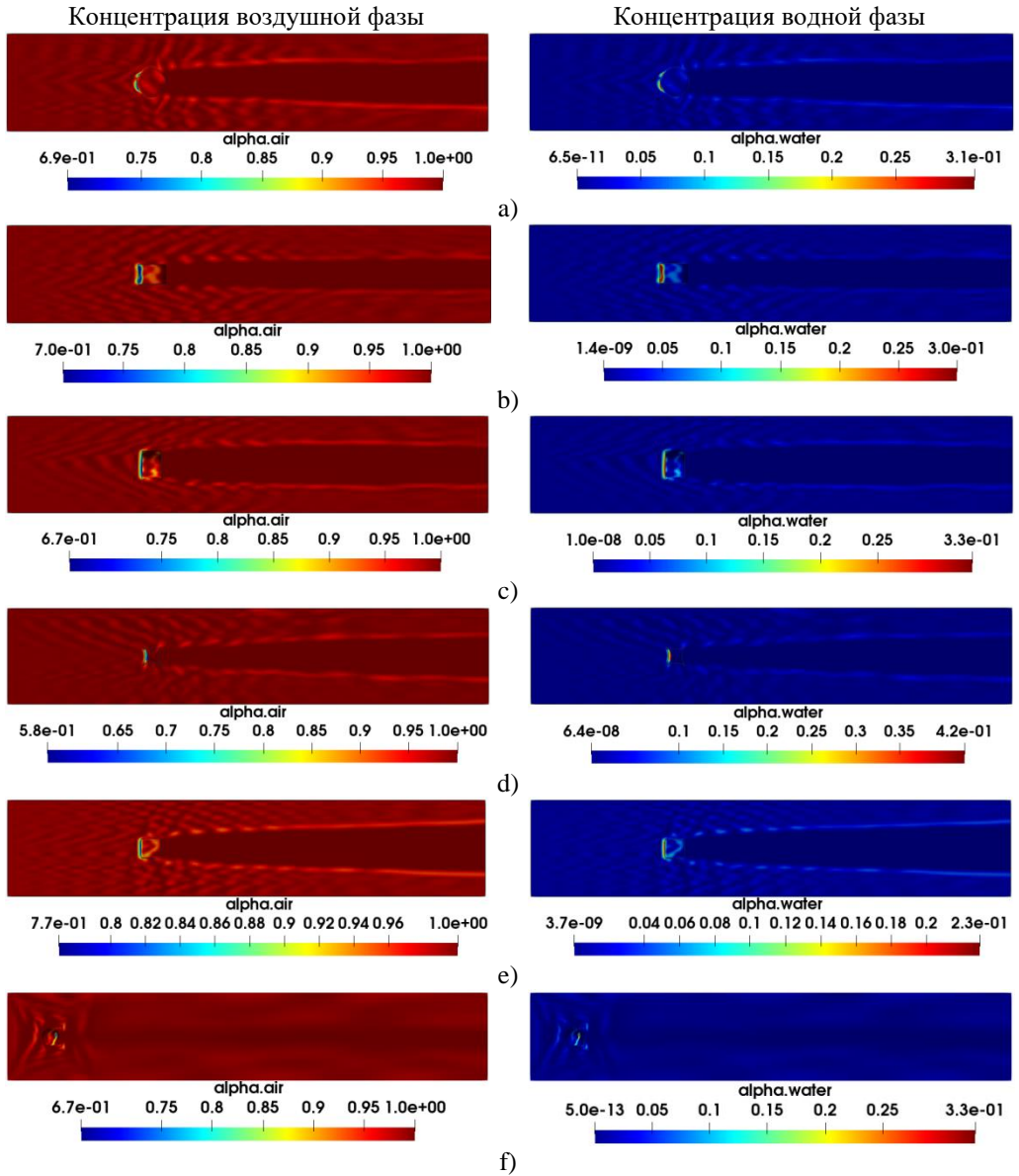


Рис. 7. Поле концентрации фаз аэровзвеси в продольном сечении расчетной области, $t = 10$ с, при обтекании двухфазным потоком: а) цилиндра, ориентированного в направлении z ; б) цилиндра, ориентированного в направлении y ; в) цилиндра, ориентированного в направлении x ; д) вогнутого шестигранника; е) куба; ф) сферы.

Fig. 7. The concentration field of the phases of the air suspension in the longitudinal section of the calculated area, $t = 10$ s, when flowing around a two-phase flow: a) a cylinder oriented in the z direction; b) a cylinder oriented in the y direction; c) a cylinder oriented in the x direction; d) a concave hexagon; e) cubes; f) spheres.

3.1 Топологические особенности ближнего следа аэровзвеси за телами простой формы

Анализ особенностей векторных полей скорости смеси, скоростей воздушной и водной фаз вблизи обтекаемого тела (рис. 8) показывает, что топология потока вблизи обтекаемого тела

имеет, как ряд общих, физически обоснованных, черт, так и набор отличительных особенностей. Так для всех тел фиксируется образование области разделения потока вблизи точки торможения на лобовой поверхности тела. При этом вектора скорости водной фазы в силу того, что число Стокса $Stk = 1689,2$ и кинетическая энергия частиц воды превышает энергию их взаимодействия с воздушным потоком, не отклоняются при приближении к преграде, что и приводит к вышеописанному повышению концентрации водной фазы вблизи лобовой поверхности обтекаемых тел.

Вихревой след за обтекаемыми телами, содержащий, преимущественно, газовую фазу, образуется вследствие вязкости потока вне зависимости от формы обтекаемого тела, однако его размеры и структура определяются, как видно из рис. 8, 9, именно формой обтекаемого тела. Для цилиндрических тел (рис. 8, 9, а-с) выявлена ориентация парных вихревых структур по ориентации поперечного сечения цилиндра, так для цилиндра, ориентированного по оси z , ось парной вихревой структуры ориентирована вдоль оси z .

Необходимо отметить асимметрию парных вихревых структур, присущую всем рассмотренным расчетным случаям. Поскольку рассматривается нестационарное обтекание, вихревые структуры периодически колеблются вблизи донной поверхности обтекаемых тел, с некоторым последовательным расширением и сжатием парных вихрей. Кроме того, для цилиндрических тел асимметрия вихревых структур в ближнем следе частично определяется сложной формой поперечного сечения цилиндров. Вихревые структуры разделены седловой точкой и системой линий растекания, положения которых определяют ориентацию и мгновенную геометрию плоскости межвихревого раздела. Из рис. 8 видно, что восстановление потока за обтекаемым телом наблюдается за пространственной особой точкой типа «фокус», ограничивающей область ближнего следа за обтекаемым телом.

Структура потока вблизи вогнутого шестигранника имеет ряд отличительных особенностей (рис. 8, 9). Так, в виду наличия острых кромок и вогнутости поверхности, наблюдается образование возвратных течений как вблизи лобовой поверхности тела, так и вблизи боковых (в том числе нижней и верхней) граней. Также наблюдается формирование парных вихревых структур в ближнем аэродинамическом следе за вогнутым шестигранником (рис. 8d, рис. 9d). Необходимо отметить, что парные вихри, формирующиеся в ближнем следе за обтекаемым телом, также сохраняют симметрию. При этом плоскость симметрии обеих вихревых структур совпадает с плоскостью симметрии расчетной области. Целесообразно отметить плотное поджатие вихрей к вогнутым подветренным и наветренным поверхностям шестигранника.

Формирование возвратных течений вблизи лобовой поверхности (ниже линии разделения потока) происходит при обтекании двухфазным потоком куба и цилиндра, ориентированного по оси x . Парные вихревые структуры, формирующиеся в ближнем следе, имеют диагональную плоскость раздела вихревых структур, которая прикреплена к верхней правой кромке куба и соответствует по длине и направлению диагонали куба. Такая пространственная ориентация вихревых структур в ближнем следе приводит одновременно к расширению следа в поперечных направлениях и к его вытягиванию (увеличению длины L_s) в продольном. Формирование седловой точки близи плоскости симметрии вихрей для данной конфигурации следа не наблюдается, а сам след ограничен узловой точкой. Также необходимо отметить влияние геометрии обтекаемого тела на ориентацию векторов скорости потока двухфазной сред над телом и за телом.

Сопоставление векторов скорости воздушной и водной фаз потока позволяет оценить влияние частиц воды на динамику взаимодействия потока с обтекаемым телом. В частности, из рис. 8 видно, что наличие частиц воды приводит к расширению границ вихревых течений за телом, в том числе к некоторому увеличению амплитуд пульсаций вихревых структур, что хорошо согласуется с результатами ряда исследований, например, работ [38-39].

Модуль скорости смеси Модуль скорости воздуха Модуль скорости воды

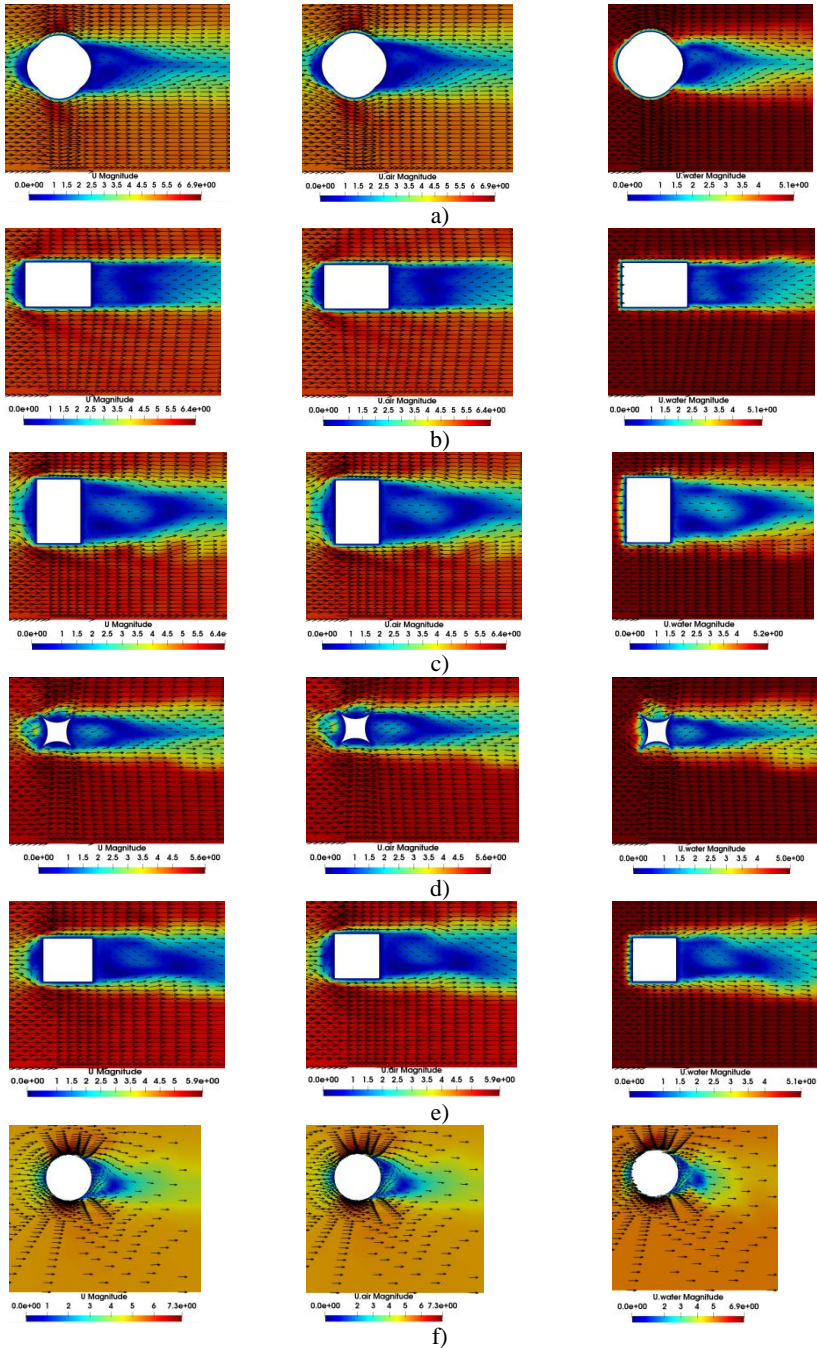


Рис. 8. Вектора скорости аэрозвеси вблизи обтекаемого тела, $t = 10$ с: а) цилиндра, ориентированного в направлении z ; б) цилиндра, ориентированного в направлении y ; в) цилиндра, ориентированного в направлении x ; д) вогнутого шестигранника; е) куба; ф) сферы.

Fig. 8. Aerosol velocity vectors near a streamlined body, $t = 10$ s:
 a) a cylinder oriented in the z direction;
 b) a cylinder oriented in the y direction;
 c) a cylinder oriented in the x direction; d) a concave hexagon; e) a cube; f) a sphere.

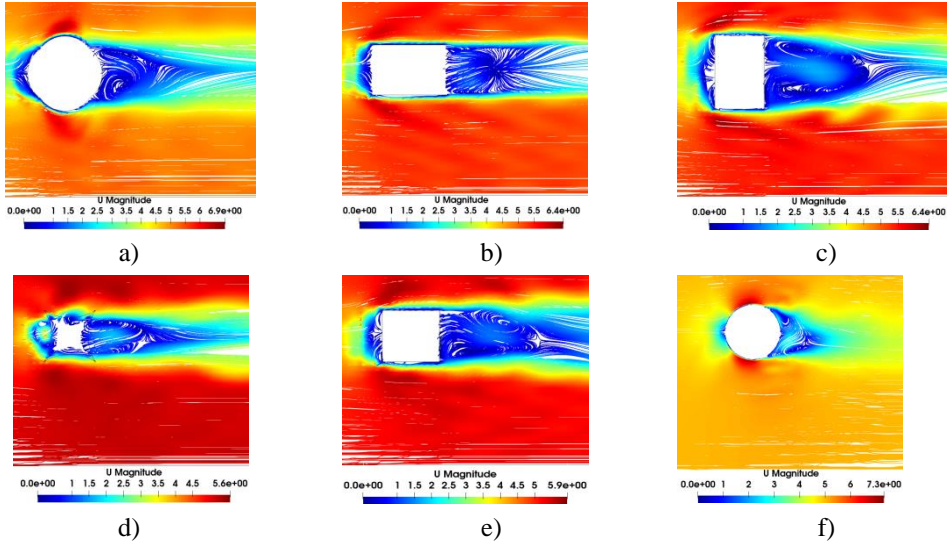


Рис. 9. Структура потока вблизи обтекаемых тел ($t=10c$), представленная в виде линий тока: аа) цилиндра, ориентированного в направлении z ; б) цилиндра, ориентированного в направлении y ; с) цилиндра, ориентированного в направлении x ; d) вогнутого шестигранника; е) куба; f) сферы.
 Fig. 9. The flow structure near streamlined bodies ($t=10c$), represented as streamlines: a) a cylinder oriented in the z direction; b) a cylinder oriented in the y direction; c) a cylinder oriented in the x direction; d) a concave hexagon; e) a cube; f) a sphere.

3.2 Влияние силы тяжести на динамику аэровзвеси в ближнем следе

Для оценки влияния силы тяжести на динамику двухфазного потока в ближнем следе сопоставим результаты численного моделирования процесса обтекания аэровзвесью цилиндра, ориентированного в вертикальном направлении, полученные без учета силы тяжести (рис. 10a) и с учетом действия силы тяжести (рис. 10b). Математическая постановка задачи согласуется с ранее представленной, система уравнений (1) дополняется вектором силы тяжести.

Учет действия силы тяжести приводит к преобладанию поперечной компоненты скорости (v) над продольной компонентой (u). Вследствие чего наблюдается перемещение частиц жидкости в направлении действия силы тяжести. Как следствие, наблюдается уменьшение области повышенного давления в зоне торможения на лобовой поверхности куба (рис. 10b), по отношению к ранее рассмотренному течению (рис. 10a), а также увеличение давления в нижней части расчетной области (рис. 10c), обусловленное накоплением там частиц воды.

Также меняется и поле скоростей (рис. 11), так на продольном сечении видна трансформация ближнего следа, формирующегося за телом: наблюдается не только уменьшение длины следа и изменение его структуры, но и изменение характера области торможения вблизи обтекаемого тела. Отмечено увеличение продольных размеров области торможения, она приобретает форму, близкую к полусфере.

Течение за кубом (рис. 11) приобретает отрывной характер, а пространственная парная вихревая структура, формируемая за кубом при учете действия силы тяжести преобразуется в подковообразный вихрь, прикрепленный к правой грани куба. Таким образом, можно сделать вывод о формировании сдвига вектора скорости водной фазы в диагональном направлении.

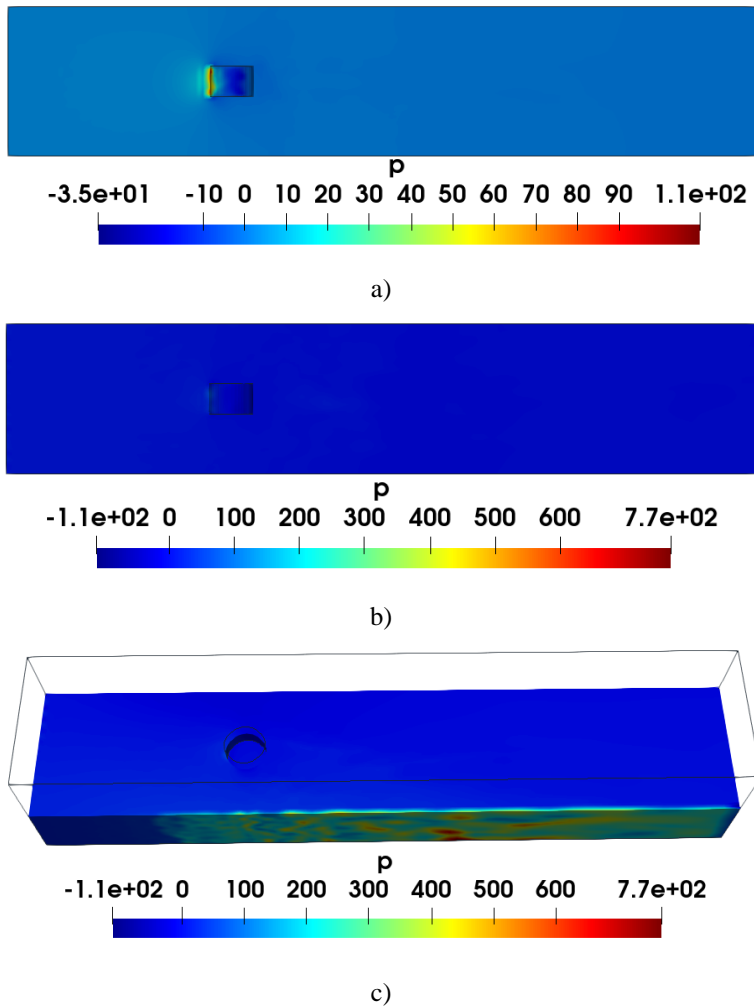


Рис. 10. Поле избыточного давления для $t = 10$ с при обтекании потоком аэрозвеси цилиндра: а) без учета действия силы тяжести плоскость XZ; б) с учетом действия силы тяжести, плоскость XZ; в) с учетом действия силы тяжести, плоскость XY.

Fig.10. The overpressure field for $t = 10$ s when the cylinder is flowed by an aerosol flow: a) without taking into account the effect of gravity, XZ plane; b) with taking into account the effect of gravity, XZ plane; c) with taking into account the effect of gravity, XY plane.

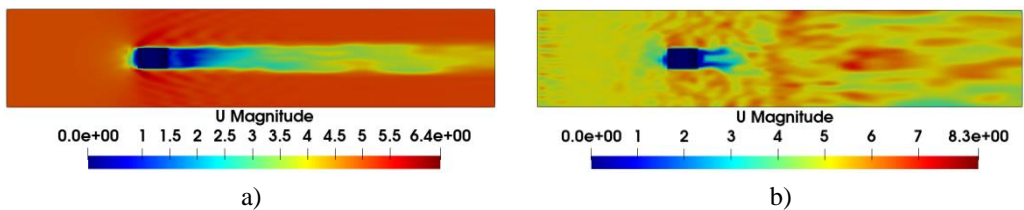


Рис. 11. Поле скорости для $t = 10$ с при обтекании потоком аэрозвеси цилиндра: а) без учета действия силы тяжести; б) с учетом действия силы тяжести.

Fig. 11. Velocity field for $t = 10$ s when the cylinder is flowed by an aerosol flow: a) without taking into account the effect of gravity; b) with taking into account the effect of gravity.

4. Заключение

В рамках работы сформулирована и предложена математическая модель динамики ближнего следа, обеспечивающая учет межфазного взаимодействия жидких частиц включений (воды) со спутным потоком воздуха и обтекаемым телом. Впервые предложен критерий оценки необходимого сеточного разрешения для задач аэродинамики ближнего следа многофазных сред. В результате работы выявлены, описаны и изучены топологические особенности структуры потока в ближнем следе за телами простой формы при обтекании их дозвуковым двухфазным потоком аэрозвеси. Показано, что форма тела оказывает существенное влияние на физические параметры двухфазного потока вблизи обтекаемого тела. Впервые оценены перепады давления в области торможения (β), и в области разряжения течения за обтекаемым телом (ϵ), а также длины области торможения (L_t) и длины ближнего следа. Выявлено и показано, что форма и характеристики вихревого следа, как и геометрия области торможения, определяются именно геометрией обтекаемого тела. Отмечено, что вихревой след за телом, преимущественно, заполнен воздушной фазой аэрозвеси. Анализ топологических особенностей структуры ближнего следа позволил выявить как особенности ориентации парных вихревых структур в следе и их зависимость от ориентации обтекаемого тела, так и оценить влияние частиц воды на динамику взаимодействия потока с обтекаемым телом. Проведенная оценка влияния силы тяжести на течение аэрозвеси вблизи обтекаемого тела и в ближнем следе показала необходимость учета действия силы тяжести при исследовании процессов аэродинамики ближнего следа многофазных сред.

Список литературы / References

- [1]. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах, М: Машиностроение, 1974, 212 с. / Sternin L. E. Fundamentals of Gas Dynamics of Two-Phase Flows in Nozzles, Moscow: Mashinostroenie, 1974, 212 p. (in Russian).
- [2]. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред, Moscow: Наука, 1978, 336 с. / Nigmatulin R. I. Fundamentals of Heterogeneous Media Mechanics, Moscow: Nauka, 1978, 336 p. (in Russian).
- [3]. Crowe C. T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles, CRC Press LLC, 1998, 509 p.
- [4]. Салтанов Г. А. Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и не однофазных сред, М.: Наука, 1979, 286 с. / Saltanov G. A. Nonequilibrium and Nonstationary Processes in Gasdynamics of Single-Phase and Multiphase Media, Moscow: Nauka, 1979, 286 p. (in Russian).
- [5]. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Газодинамика двухфазных сред. М: Энергоиздат, 1981, 472 с. / Deutsch, M. E. and Filippov, G. A. Gas Dynamics of Two-Phase Media. Moscow: Energoizdat, 1981, 472 p. (in Russian).
- [6]. Яненко Н. Н., Солоухин Р. И., Папырин А. Н., Фомин В. М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. Новосибирск: Наука, 1980, 160 с. / Yanenko N. N., Soloukhin R. I., Papyrin A. N., Fomin V. M. Supersonic two-phase flows under conditions of particle velocity nonequilibrium. Novosibirsk: Nauka, 1980, 160 p. (in Russian).
- [7]. Hayakawa H., Takadam S., Garzmo V. Kinetic theory of shear thickening for a moderately dense gas-solid suspension: From discontinuous thickening to continuous thickening *Physical Review E*, 2017, vol. 96, issue no. 4. 042903.
- [8]. Tada Y., Yoshioka S., Takimoto A., Hayashi Y. Heat transfer enhancement in a gas-solid suspension flow by applying electric field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 93, pp. 778-787.
- [9]. Фомин В. М., Федоров А. В. Развитие исследований по механике реагирующих гомогенных и гетерогенных сред в ИТПМ СО РАН. Физика горения и взрыва, 2015, т. 51, вып. № 2, с. 92-101. / Fomin V. M., Fedorov A. V. Research in Mechanics of Reacting Homogeneous and Heterogeneous Media at the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, *Combust. Explos. Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 223-231; see also: *Fiz. Goren. Vzryva*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 92-101 (in Russian).
- [10]. Шилияев М. И., Хромова Е. М. Аэродинамика и тепломассообмен многокомпонентных многофазных потоков и их приложения: монография. Изд. Ассоциации строительных вузов (АСВ), 2018, 299 с. / Shilyaev M. I., Khromova, E. M. Aerodynamics and Heat and Mass Transfer of

Multicomponent Multiphase Flows and Their Applications: A Monograph. Association of Construction Universities (ASV) Publishing House, 2018, 299 p. (in Russian).

- [11]. Кутушев А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. Санкт-Петербург: Недра, 2003, 284 с. / Kutushev A. G. Mathematical Modeling of Wave Processes in Aerosol and Powder Media. St. Petersburg: Nedra, 2003, 284 p. (in Russian).
- [12]. Вараксин А.Ю. Влияние частиц на турбулентность несущего потока газа Теплофизика высоких температур, 2015, т. 53, вып. № 3, с. 441-466. / Varaksin A. Yu., Effect of Particles on Carrier Gas Flow Turbulence, High Temp., 2015, vol. 53, no. 3, pp. 423–444; see also: Teplofiz. Vys. Temp., 2015, vol. 53, no. 3, pp. 441-466 (in Russian).
- [13]. Тукмаков А. Л., Тукмаков Д. А. Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газозвеси Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика, 2022, т. 22, вып. № 1, с. 90-102. / Tukmakov A. L., Tukmakov D. A., Numerical Study of the Influence of the Parameters of Dispersed Particles on the Deposition of the Solid Phase of an Electrically Charged Polydisperse Gas Suspension, Izv. Sarat. Univ. (N.S.) Ser. Mat. Mekh. Inform., 2022, vol. 22, issue no. 1, pp. 90-102 (in Russian).
- [14]. Тукмаков А. Л. Численная модель электрогазодинамики аэродисперсной системы на основе уравнений движения двухскоростной двухтемпературной газозвеси Прикладная механика и техническая физика, 2015, т. 56, вып. № 4, с. 112-120 / Tukmakov A. L., Numerical Model of the Electro-Gas-Dynamics of a Gas-Particle System Based on the Equations of Motion of a Two-Velocity Two-Temperature Gas-Particle Mixture, J. Appl. Mech. Tech. Phys., 2 (In Russian).
- [15]. Моисеева К. М., Крайнов А.Ю. Влияние состава угольной пыли на скорость распространения фронта горения по взрывзвеси с неоднородным распределением частиц. Компьютерные исследования и моделирование, 2018, т. 10, вып. № 2, с. 221-230. / Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., The Influence of the Coal Dust Composition on the Propagation Speed of the Combustion Front of the Coal Dust with an Inhomogeneous Particle Distribution in the Air, Kompyuternye Issledovaniya i Modelirovanie, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 221-230 (in Russian).
- [16]. Тукмаков А. Л. Численное моделирование процесса волновой сепарации твердых частиц при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе Акустический журнал, 2009, т. 55, вып. № 3, с. 342-349. / Tukmakov A. L., Numerical Simulation of the Process of Wave Separation of Solid Particles in Resonance Gas Vibrations in the Closed Pipe, Acoust. Phys., 2009, vol. 55, no. 3, pp. 345-352; see also: Akust. Zh., 2009, vol. 55, no. 3, pp. 342–349 (in Russian).
- [17]. Губайдуллин Д. А., Тукмаков, Д. А. Численное исследование массопереноса дисперсных частиц при прохождении ударной волны по моно- и полидисперсной газозвеси. Прикладная математика и механика, 2023, т. 87, № 3, с. 461-474 / Gubaidullin D. A., Tukmakov D. A. Numerical Investigation of the Mass Transfer of Dispersed Particles during the Passage of a Shockwave in a Mono and Polydisperse Gas Suspension, Prikl. Mat. Mekh., 2023, vol. 87, no. 3, pp. 461-474 (in Russian).
- [18]. Tsirkunov Yu. M. Gas-particle flows around bodies – key problems, modeling and numerical analysis. Proc. Fourth International Conference on Multiphase Flow (Ed.: E. Michaelides, May 27 – June 1, 2001, New Orleans, LA, USA). CD ROM Proc. ICMF'2001, 2001, no. 609, 31 p.
- [19]. Ревизников Д. Л., Способин А. В. Алгоритмы прямого численного моделирования динамики дисперсной фазы при обтекании тела запыленным потоком Труды МАИ, 2007, № 26, 13 с. / Reviznikov D. L., Sposobin A. V., Algorithms for Direct Numerical Modeling of the Dispersed Phase Dynamics in Dusty Flow around a Body, Trudy MAI, 2007, no. 26, 13 p. (in Russian).
- [20]. Анисимова И. В., Игнатьев В. Н. Об одном подходе определения переносных характеристик в многокомпонентной среде Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Актуальные проблемы механики сплошной среды – 2020. (28 сентября – 2 октября 2020 г. Ижевск). Ижевск: ООО "Принт", 2020, с. 24–29. / Anisimova I. V., Ignatiev V. N., On One Approach to Determining Transfer Characteristics in a Multicomponent Environment, in Current Issues of Continuum Mechanics: Proc. of the All-Russian scientific Conference (Kazan, Russian Federation, 2020), pp. 24–29 (in Russian).
- [21]. Стасенко А. Л. Физические аспекты многофазных течений в аэродинамике, летательной технике и авиационной экологии ТРУДЫ МФТИ, 2011, т. 3, № 4, с. 108-126. / Stasenko A. L., Physical Aspects of Multiphase Flows in Aerodynamics, Aircraft Engineering and Aviation Ecology, Trudy MFTI, 2011, vol. 3, no. 4, pp. 108-126 (in Russian).

- [22]. Атрошенко, С.Ю. Аэродинамические исследования конвективного потока при его взаимодействии с потоком закрученного газа *Строительство и техногенная безопасность*, 2014, № 49, с. 135-140. / Atroshchenko S. Yu., *Aerodynamic Studies of Convective Flow during Its Interaction with a Swirling Gas Flow*, *Stroitel'stvo i Tekhnogennaya Bezopasnost'*, 2014, no. 49, pp. 135-140 (in Russian).
- [23]. Бузыкин О. Г., Казаков А. В. Численное моделирование ближнего следа за моделью полукрыла в аэродинамической трубе при умеренных числах Рейнольдса *Ученые записки ЦАГИ*, 2007, т. XXXVIII, № 3-4, с. 31-44. / Buzykin, O. G., Kazakov, A. V. Numerical Modeling of the Near Wake behind a Semi-Wing Model in a Wind Tunnel at Moderate Reynolds Numbers, *Uch. Zapiski TsAGI*, 2007, vol. 38, nos. 3-4, pp. 31-44 (in Russian).
- [24]. Gurka R., Krishnan K., Ben-Gida H., Kirchhefer A. J., Kopp G. A., Guglielmo C. G. Flow pattern similarities in the near wake of three bird species suggest a common role for unsteady aerodynamic effects in lift generation. *Interface Focus*, 2017, vol. 7, pp. 20160090.
- [25]. Иваньшин П. Н., Широкова Е. А. Приближенное решение задачи обтекания семейства контуров. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием Актуальные проблемы механики сплошной среды (28 сентября – 2 октября 2020, Ижевск). Ижевск: ООО "Принт", 2020, с. 172-175. / Ivanshin P. N., Shirokova E. A., Approximate Solution of the Problem of Flow around a Family of Contours, in *Current Issues of Continuum Mechanics: Proc. of the All-Russian Scientific Conference (Kazan, Russian Federation, 2020)*, pp. 172–175 (in Russian).
- [26]. Волкова А. О., Стрельцов Е. В. Численное моделирование обтекания профиля паса-0012 в струйно-перфорированных границах. *Труды МФТИ*, 2019, т. 11, вып. 3(43), с. 116-125. / Volkova A. O., Streltsov E. V. Numerical Study of Jet Perforated Boundaries in the Flow over the Profile NACA-0012, *Trudy MFTI*, 2019, vol. 11, no. 3 (43), pp. 116-125 (in Russian).
- [27]. Исаев С. А. Круговая обдувка профиля NACA0012 при $Re=40000$: парадоксы моделирования в нестационарной аэродинамике Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, 2012, № 2(10), с. 226-231. / Isaev S. A. Circular Flow of the NACA-0012 Profile at $Re = 40000$: Paradoxes of Modeling in NonStationary Aerodynamics, *Sovremennaya Nauka: Issledovaniya, Idei, Rezul'taty, Tekhnologii*, 2012, no. 2 (10), pp. 226-231 (in Russian).
- [28]. Charles L. Ladcon Effects of Independent Variation of Mash and Reynolds Number on the LowSpeed Aerodynamic Characteristics of the NASA 0012 Airfoil Section. *Nasa Technical Memorandum 4074*, October 1988, p. 95.
- [29]. Wardle K. E., Weller H. G. Hybrid Multiphase CFD Solver for Coupled Dispersed/Segregated Flows in Liquid-Liquid Extraction. *International Journal of Chemical Engineering*, 2013, issue no. 1, pp. 128936. DOI: 10.1155/2013/128936.
- [30]. Tocci F. Assessment of a hybrid VOF two-fluid CFD solver for simulation of gas-liquid flows in vertical pipelines in OpenFOAM *Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica, Politecnico di Milano. Anno Accademico 2015-2016*.
- [31]. Chen J., Anastasiou C., Cheng S., Basha N.M., Kahouadji L., Arcucci R., Angeli P., Matar O.K. Computational fluid dynamics simulations of phase separation in dispersed oil-water pipe flows. *Chem. Eng. Sci.* 2023, vol. 267, p. 118310. DOI: 10.1016/j.ces.2022.118310.
- [32]. Wardle K., Weller H. Hybrid Multiphase CFD Solver for Coupled Dispersed/Segregated Flows in Liquid-Liquid Extraction. *International Journal of Chemical Engineering*. 2013, vol. 2013, p. 128936. DOI: 10.1155/2013/128936.
- [33]. Shonibare O.Y., Wardle K.E. Numerical investigation of vertical plunging jet using a hybrid multifluid-VOF multiphase CFD solver. *International Journal of Chemical Engineering*. 2015, vol. 2015, p. 925639. DOI: 10.1155/2015/925639.
- [34]. Toro E. F. *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: A practical introduction*. 3rd ed. Berlin: Springer, 2009. 724 pp.
- [35]. Байметова Е.С., Митрюкова Е.А., Чернова А.А., Шигапова А.Р. Особенности формирования вихревого следа в дозвуковом двухфазном потоке. *Химическая физика и мезоскопия*, 2025, т. 27, № 2, с. 124-133. / Baymetova E.S., Mitrukova E.A., Chernova A.A., Shigapova A.R. Peculiarities of vortex trace formation in subsonic two-phase flow. *Chemical physics and mesoscopy*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 124-133. DOI: 10.62669/17270227.2025.2.12 (in Russian).
- [36]. Baymetova E.S., Chernova A.A., Shigapova A. R. Numerical Modeling of Air Suspension Near-Wake Dynamics, *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2025. DOI: 10.20537/nd250702.
- [37]. Haupt S.E. Detached Eddy Simulation of Atmospheric Flow About a Surface Mounted Cube at High Reynolds Number. *Journal of Fluids Engineering*. 2011, 39 p. DOI: 10.1115/1.4003649.

- [38]. Aganin A.A., Khismatullina N.A. Water Vapor Compression in the Regime with Dissociation. *Lobachevskii J Math* 46, 1949-1960 (2025). DOI: 10.1134/S1995080225606873.
- [39]. Kozelkov A.S., Meleshkina D.P., Kurkin A.A., Tarasova N.V., Lashkin S.V., Kurulin V.V. Fully implicit method for solution of Navier – Stokes equations for simulation of multiphase flows with free surface. *Journal of Computational Technologies*, 2016, vol. 21, no. 5, 2016, pp. 54-76.

Информация об авторах / Information about authors

Алена Алексеевна ЧЕРНОВА – доктор технических наук, профессор кафедры Тепловые двигатели и установки. Сфера научных интересов: газодинамика, гидродинамика, конвективный теплообмен, теплопередача, математическое моделирование.

Alena Alekseevna CHERNOVA – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of thermal engines and installations, Kalashnikov Izhevsk state technical university. Research interests: gas dynamics, hydrodynamics, convective heat exchange, heat transfer, mathematical modeling.

