

Received: 21.01.2026

Revised: 18.05.2026

Accepted: 22.05.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.4.047-058

THE INFLUENCE OF AIR-BORNE SUSPENSION INJECTION VELOCITY ON NEAR-WAKE DYNAMICS

E. S. Baymetova^a, L. K. Makarkin^b, A. A. Chernova^{c,*}, and A. R. Shigapova^d

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

^a  <https://orcid.org/0000-0002-4534-0936>  baimetovaes@gmail.com;

^b  levkononov1@gmail.com;

^c  <https://orcid.org/0000-0001-8579-6279>  alicaaa@gmail.com;

^d  <https://orcid.org/0000-0003-2668-0422>  aigulka1806@mail.ru

*Corresponding author. Email: alicaaa@gmail.com

Address for correspondence: ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Russia

This paper discusses the features of the near-wake aerodynamics of a multiphase air-borne suspension and studies the effect of the initial velocity of a subsonic two-phase flow on near-wake dynamics. The spatial problem of the flow of a two-phase medium (air-borne suspension with a water content of 1%) around a cube is considered. The calculated area is a 10.9 m long parallelepiped, square in the cross section with a characteristic size of 2.2 m, inside which, at an equal distance from the side, upper, and lower faces and at a distance of 0.7 m from the left side, there is a cube with a side length $d = 0.2$ m. The side, top, and bottom faces of the parallelepiped are impenetrable walls. The physical properties of the two-phase medium are determined by the standard properties of its components (air and water); the surface tension at the interface (σ) is 0.0728 N/m. The presence of the second phase and its dynamics are considered within the framework of the Euler and Lagrange approaches. As a result of a series of computational experiments, graphs of the variation of the homogenization criterion in the section behind the cube ($x = 1.1$ m) are plotted, and the topological features of a viscous vortex wake formed behind the streamlined body are analyzed. Criterial dependences are established for estimating the maximum velocity of liquid particles in the air-borne suspension flow depending on the initial velocity of the air-borne suspension, as well as functional dependences for estimating the position of the intervortical shear flow boundary, the flow separation point when the cube is flown around, and the characteristic size of the near wake. A diagram of the regimes of a two-phase air-borne suspension flow around a cube is constructed. It is shown that, at air phase velocities related to the region of transient (or undeveloped) turbulent gas flow, the regime of the air-borne suspension flow around a body is determined by the concentration of the aqueous phase.

Keywords: numerical modeling, near-wake aerodynamics, multiphase flows, Euler method, Lagrange method, cube-shaped streamlined body

Acknowledgment

This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-21-00067, <https://rscf.ru/project/25-21-00067>).

References

1. Shvets, A.I. and Shvets, I.T. *Gazodinamika blizhnego sleda* [Gas Dynamics of Near Wake]. Naukova Dumka Publ., Kiev, 1976, 382 p. (In Russian).
2. Ginevsky, A.S. and Zhelannikov, A.I. *Vikhrevyye sledy samoletov* [Vortex Wakes of Aircrafts]. Fizmatlit Publ., Moscow, 2008, 169 p. (In Russian).
3. Kovenya, V.M. and Lebedev, A.S. Numerical modeling of laminar and turbulent flows in the wake of a body. *Vychislitelnye Tekhnologii*, 1997, 2 (6), 42–52. (In Russian).
4. Volkov, K.N. and Emelyanov, V.N. *Techeniya gaza s chastitsami* [Gas Flows with Particles]. Fizmatlit Publ., Moscow, 2008, 600 p. (In Russian).
5. Fuks, N.A. *Mekhanika aerozolei* [The Mechanics of Aerosols]. Izd-vo Akad. Nauk SSSR Publ., Moscow, 1955, 352 p. (In Russian).
6. Fomin, V.M. and 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. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, 51 (2), 223–231. DOI: 10.1134/S0010508215020069.
7. Nigmatulin, R.I. *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of Mechanics of Heterogeneous Media]. Nauka Publ., Moscow, 1978, 336 p. (In Russian).
8. Nigmatulin, R.I., *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of Multiphase Media. Part 1]. Nauka Publ., Moscow, 1987, 464 p. (In Russian).
9. Rakhmatulin, Kh.A. Fundamentals of gas dynamics of interpenetrating motions of compressible media. *Prikl. Mat. i Mekh.*, 1956, 20 (2), 184–195. (In Russian).
10. Baymetova, E.S., Chernova, A.A., and Shigapova, A.R. Numerical modeling of air suspension near-wake dynamics. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2025, 21 (3), 321–334. DOI: 10.20537/nd250702.
11. Baymetova, E.S., Mitrukova, E.A., Chernova, A.A., and Shigapova, A.R. Peculiarities of vortex trace formation in subsonic two-phase flow. *Chemical Physics and Mesoscopy*, 2025, 27 (2), 124–133. DOI: 10.62669/17270227.2025.2.12. (In Russian).

Подана в журнал: 21.01.2026

УДК 533

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.4.047-058

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВДУВА АЭРОВЗВЕСИ НА ДИНАМИКУ БЛИЖНЕГО СЛЕДА

Е. С. Байметова^а, Л. К. Макаркин^б, А. А. Чернова^в*, А. Р. Шигапова^г

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова»,
ул. Студенческая, д. 7, г. Ижевск, 426008, Россия*

^а  <https://orcid.org/0000-0002-4534-0936>  baimetovaes@gmail.com;

^б  levkononov1@gmail.com;

^в  <https://orcid.org/0000-0001-8579-6279>  alicaaa@gmail.com;

^г  <https://orcid.org/0000-0003-2668-0422>  aigulka1806@mail.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: alicaaa@gmail.com

Адрес для переписки: ул. Студенческая, д. 7, г. Ижевск, 426069, Россия

В данной работе рассматриваются особенности аэродинамики ближнего следа многофазной аэровзвеси, исследуется влияние начальной скорости дозвукового двухфазного потока на динамику ближнего следа. Рассматривается пространственная задача об обтекании куба потоком двухфазной среды (аэровзвесью с содержанием воды 1 %). Расчетная область представляет собой параллелепипед длиной 10,9 м с квадратом в сечении с характерным размером 2,2 м, внутри которого на равном удалении от боковых, верхней и нижней граней и на расстоянии 0,7 м от левой грани расположен куб с длиной стороны $d = 0,2$ м. Боковые, верхняя и нижняя грани параллелепипеда являются непроницаемыми стенками. Физические свойства двухфазной среды определены стандартными свойствами ее компонентов (воздуха и воды), поверхностное натяжение на межфазной границе (σ) составляет 0,0728 Н/м. Наличие второй фазы и ее динамика рассматриваются в рамках подходов Эйлера и Лагранжа. В результате серии вычислительных экспериментов построены графики изменения критерия гомогенизации в сечении за кубом ($x = 1,1$ м), проанализированы топологические особенности вязкого вихревого следа, формируемого за обтекаемым телом. Установлены критериальные зависимости для оценки максимальной скорости частиц жидкости в потоке аэровзвеси в зависимости от начальной скорости аэровзвеси, а также функциональные зависимости для оценки положения границы сдвигового течения между вихрями, точки отрыва потока при обтекании куба и характерных размеров ближнего следа. Построена диаграмма режимов обтекания куба двухфазным потоком аэровзвеси, показано, что при скоростях воздушной фазы, относящихся к области переходного (или неразвитого) турбулентного течения газа, режим обтекания тела аэровзвесью определяет концентрация водной фазы.

Ключевые слова: численное моделирование, аэродинамика ближнего следа, многофазные потоки, метод Эйлера, метод Лагранжа, обтекаемое тело – куб

1. Введение

Разнообразие исследований и приложений для численного моделирования явлений аэродинамики ближнего и дальнего следа [1–3] связано как с развитием экспериментально-численных средств исследования (аэродинамические трубы, импульсные установки, развитие систем измерительной техники и методов визуализации – от теневых приборов и термоанемометров различной сложности до современных систем засева потока мультифракционным составом микронных частиц в совокупности с применением средств визуализации на

основе лазерных ножей – при увеличении мощности вычислительной техники и, как следствие, точности программных средств математического моделирования), так и с прикладными аспектами таких исследований (аэродинамика различных технических средств и систем, отдельные приложения строительной аэромеханики).

Однако большинство исследователей [1–3] изучение закономерностей ближнего аэродинамического следа строят в рамках предположения об однофазности (единственности агрегатного состояния) рабочей среды, а именно воздуха. Вследствие этого вопросы влияния различных включений, в том числе и находящихся в ином агрегатном или фазовом состоянии, на динамику потока в целом и аэродинамику ближнего следа такой аэрозвеси в частности остаются малоизученными.

Известен и описан [4–9] механизм движения многофазной среды: за счет вязких сил несущей фазы (газа либо жидкости) происходит вовлечение в движение потока частиц включений (например, твердых и жидких для газообразной несущей среды), что обуславливает инициацию вторичных теплофизических процессов, сопряженных со взаимодействием частиц дисперсных фаз как между собой, так и с несущим потоком (например, процессы теплообмена, дробления и коагуляции частиц и т. д.). При этом математическое описание такой совокупности взаимосвязанных процессов, как и решение полученных систем уравнений, остается сложной и вычислительно емкой задачей.

Необходимо отметить, что исследование особенностей формирования ближнего следа при обтекании тел различной геометрии многофазным полидисперсным потоком остается актуальным как для решения технических задач (предотвращение обледенения подветренных поверхностей летательных аппаратов различной сложности, совершенствование форм конструктивных элементов различных устройств для уменьшения влияния многофазности воздуха и т. п.), так и для исследования и описания различных природных процессов и явлений (пылевые бури, естественные процессы эрозии пород и строений и т. д.). Таким образом, целью данной работы является исследование особенностей аэродинамики ближнего следа многофазной аэрозвеси при различных начальных скоростях дозвукового двухфазного потока.

2. Постановка задачи

Рассматривается пространственная задача об обтекании куба потоком двухфазной среды (аэрозвесью с содержанием воды 1 %). Расчетная область продемонстрирована на рис. 1 и представляет собой параллелепипед длиной 10,9 м с квадратом в сечении с характерным размером 2,2 м, ограниченный сверху и снизу непроницаемыми границами. Оценка необходимого удаления границ расчетной области от обтекаемого тела приведена в работе [10]. Физические свойства двухфазной среды представлены в таблице, поверхностное натяжение на межфазной границе σ составляет 0,0728 Н/м).



Рис. 1. Геометрическая модель

Размеры расчетной области определены следующим образом: обтекаемое тело – куб с длиной стороны $d = 0,2$ м – удален от входной границы расчетной области (рис. 1) на 0,7 м и равноудален от боковых границ области на 1 м.

Таблица

Физические свойства фаз аэровзвеси

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	–

Наличие второй фазы и ее динамика рассматриваются в рамках подходов Эйлера и Лагранжа.

С учетом принятых допущений динамика двухфазного потока в рамках подхода Эйлера (применение метода Эйлера для описания динамики обеих фаз и их взаимодействия) может быть описана следующей системой:

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

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

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

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 -й фазы; p – давление; u, v, w – компоненты вектора скорости; e_k – полная энергия единицы массы k -й фазы; f_k – массовая сила, действующая на частицы k -й 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 -й фазы; μ_k – динамический коэффициент вязкости k -й фазы.

В рамках подхода Лагранжа динамика аэровзвеси может быть описана системой уравнений

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_{vm} + \mathbf{F}_o; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}_{pn}^k}{dt} &= \mathbf{v}_{pn}^k; \\ m_{pn}^k \frac{d\mathbf{v}_{pn}^k}{dt} &= \mathbf{f}_{pn}^k; \\ J_p^k \frac{d\mathbf{v}_{pn}^k}{dt} &= \mathbf{I}_{pn}^k; \\ \frac{dm_{pn}^k}{dt} &= j_{pn}^k. \end{aligned} \quad (3)$$

Влияние несущего потока газа и частиц включения друг на друга обуславливает как межфазный обмен массой [7], так и межфазный обмен импульсом [9] и энергией [8]. В общем случае межфазные обмены можно представить в следующем виде:

$$\psi_{ji} = 4\pi r^3 n_i n_j |\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i|, \quad (4)$$

$$J_{ji} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \psi_{ji} \kappa_j, \quad (5)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla^k n_i v_i^k = \sum_{j=1}^N \psi_{ji}, \quad (6)$$

$$n_i = \frac{3\alpha_i}{4\pi r^3}, \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{ji} = \mathbf{R}_{ji} + J_{ji} \mathbf{V}_{ij}, \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{ji} = p \nabla \alpha_i + \sum_{j=1}^N \mathbf{F}_{ji}, \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_{ji} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho^0 \psi_{ji} (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i) \kappa_F, \quad \mathbf{F}_{ji} = -\mathbf{F}_{ij}, \quad (10)$$

$$\rho_i \frac{d_i e_i}{dt} = \rho_i A_i + \rho_i Q_i + \sum_{j=1}^N J_{ji} (e_{ji} + e_i), \quad (11)$$

$$\rho_i Q_i = -\nabla^k q_i^k + \sum_{j=1}^N Q_{ji}, \quad (12)$$

$$\rho_i A_i = \frac{\alpha_i v_i}{\rho_i^0} \frac{d\rho_i^0}{dt} - \tau_i^{km} \nabla^k v_i^m + \sum_{j=1}^N \left[\mathbf{F}_{ji} \cdot (\mathbf{V}_{ji} - \mathbf{V}_i) + J_{ji} \frac{(\mathbf{V}_{ji} - \mathbf{V}_i)^2}{2} \right], \quad (13)$$

где J_{ji} – межфазный обмен массой; ψ_{ji} – число соударений между частицами i -й и j -й фаз; $\mathbf{P}_{ji}$ – интенсивность межфазного обмена импульсом; $\mathbf{R}_{ji}$ – межфазная сила, отнесенная к единице объема смеси; $\mathbf{V}_{ij}$ – скорость вещества i -й фазы на границе с j -й фазой; $\mathbf{F}_{ji}$ – избыточный импульс от удара частиц j -й фазы относительно i -й фазы в движении; e_i – полная энергия единицы массы i -й фазы; τ_i^{km} – тензор макроскопических вязких сил; ρ_i^0 – начальная плотность фракций в смеси; v_i^m – компонента скорости i -й фазы смеси на межфазной границе; q_i^k – тепловой поток фракции смеси; Q_{ji} – интенсивности контактного теплообмена между фазами; κ_F – коэффициент оценки перехода j -й фазы в i -ю при соударении; α_i – объемная фа-

зовая доля фракций в аэровзвеси; r – радиус частиц включений (при равенстве геометрических размеров); κ_j – коэффициент оценки доли соударений с межфазным переходом массы.

Для применения предложенного математического аппарата к математическому описанию динамики аэровзвеси необходимо как ввести ряд дополнительных допущений, определенных параметрами аэровзвеси, так и дополнить модель уравнениями для учета полидисперсности и неоднородности (по плотности и фазовому составу) включений.

Дополнительные допущения:

- 1) рассматриваются изотермические процессы, рабочие среды считаются нетеплопроводными, а система в целом – изолированной;
- 2) скорость частиц включений в начальный момент времени определяется скоростью несущего потока и равна ему;
- 3) концентрация включений определяется объемной долей;
- 4) фазы аэровзвеси считаются химически инертными;
- 5) обтекаемые тела приняты абсолютно гладкими;
- 6) учет полидисперсности включений строится на основе метода Монте-Карло.

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 ($u = 5 \cdot 10^{-5} \div 50$ 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.

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 модулей multiphaseEulerFoam и MPPICFoam, входящих 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.

Дискретизацию расчетной области по пространству производили с помощью шестигранных элементов, размеры которых варьировались в диапазоне от 10^{-4} до $2,5 \cdot 10^{-3}$ м при общем их количестве 15 760 000, в направлении обтекаемого тела (до, после и вокруг тела); использовали сгущение сетки. Результаты исследования сеточной сходимости представлены в работах [10, 11].

3. Результаты численного моделирования

На рис. 2 представлены поля модуля скорости и давления в расчетной области, полученные для различных скоростей вдува аэровзвеси в рамках метода Эйлера. Показано, что аэродинамика ближнего следа при скоростях вдува аэровзвеси (при условии равенства скоростей фаз в начальный момент времени) согласуется с динамикой однофазного потока: фиксируется образование области торможения вблизи кормовой грани куба, вблизи боковых граней тела наблюдается формирование локальных вихревых областей, за телом наблюдается формирование области разряжения, ориентированной по оси симметрии тела и включающей в себя элементы вихревого следа. Однако при малых скоростях вдува потока ($Re \leq 6350$) структура потока аэровзвеси в расчетной области имеет хаотичный, нерегулярный характер, что может быть связано с особенностью вычислительных схем либо с ограниченной применимостью метода Эйлера.

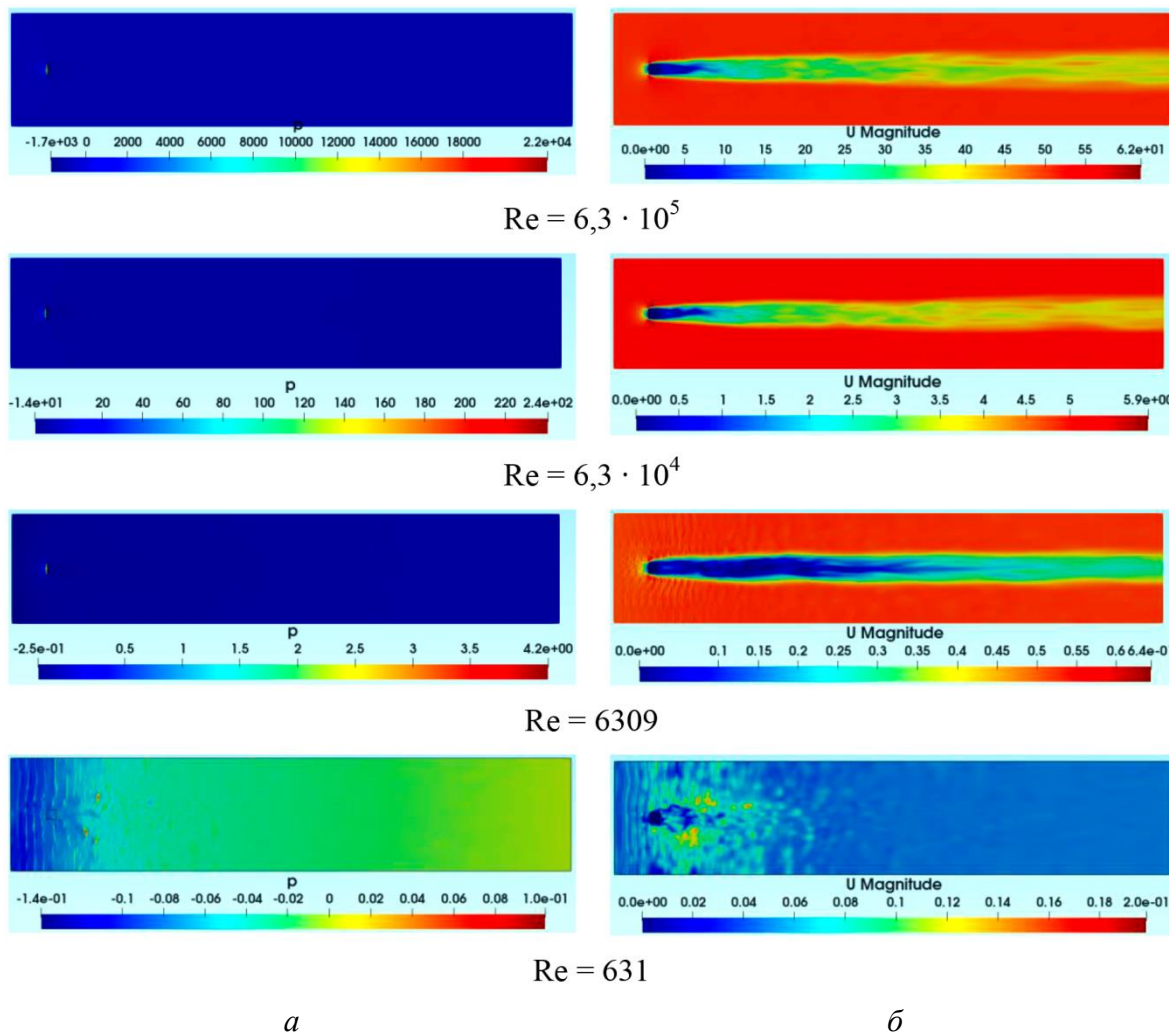


Рис. 2. Поля давления (*a*) и модуля скорости (*б*), полученные для различных скоростей вдува аэровзвеси в рамках метода Эйлера

На рис. 3 представлены поля модуля скорости и давления в расчетной области, полученные для различных скоростей вдува аэровзвеси в рамках подхода Лагранжа. Из рисунка видно, что ранее описанные особенности изменения характера аэродинамического обтекания двухфазной 1-процентной аэровзвесью куба при низких скоростях вдува потока формируются и в рамках приближения Лагранжа. Такое поведение потока может быть как следствием критически низких (в рамках аэродинамических масштабов) скоростей потока, с одной стороны, так и численными ошибками схем – с другой.

Дополнительно рассмотрим особенности аэродинамики двухфазного потока при низкой концентрации водной фазы. На рис. 4 приведены распределения полей концентрации воды в продольном сечении куба для аэровзвеси с содержанием воды 0,1 % при различных режимах течения.

Анализ полей концентраций воды подтверждает, что для низких скоростей вдува (Re) применение метода Эйлера некорректно. На рис. 5 показаны векторные поля скорости потока вблизи куба для различных скоростей вдува аэровзвеси. Выявлено и показано, что увеличение скорости вдува аэровзвеси сопряжено с изменением топологии потока вблизи ребер кормовой грани куба (при числах Рейнольдса менее 10 000 области разворота потока вблизи ребер лицевой грани имеют сферообразную форму с радиальным удлинением диаметра $0,18 \cdot d_c$ в диагональном направлении (рис. 5, $Re = 6309$)), а также с изменением формы и размеров обратных течений в вихревом следе (наблюдается перестроение областей обратного течения:

нижняя вихревая структура при увеличении скорости вдува аэровзвеси уменьшается, верхний вихрь расширяется, граница сдвигового течения между вихрями снижается ближе к центру на расстояние, которое определяется числом Re_p и эквивалентным диаметром как $h_v = 0,0492 \cdot Re_p \cdot d_e$.

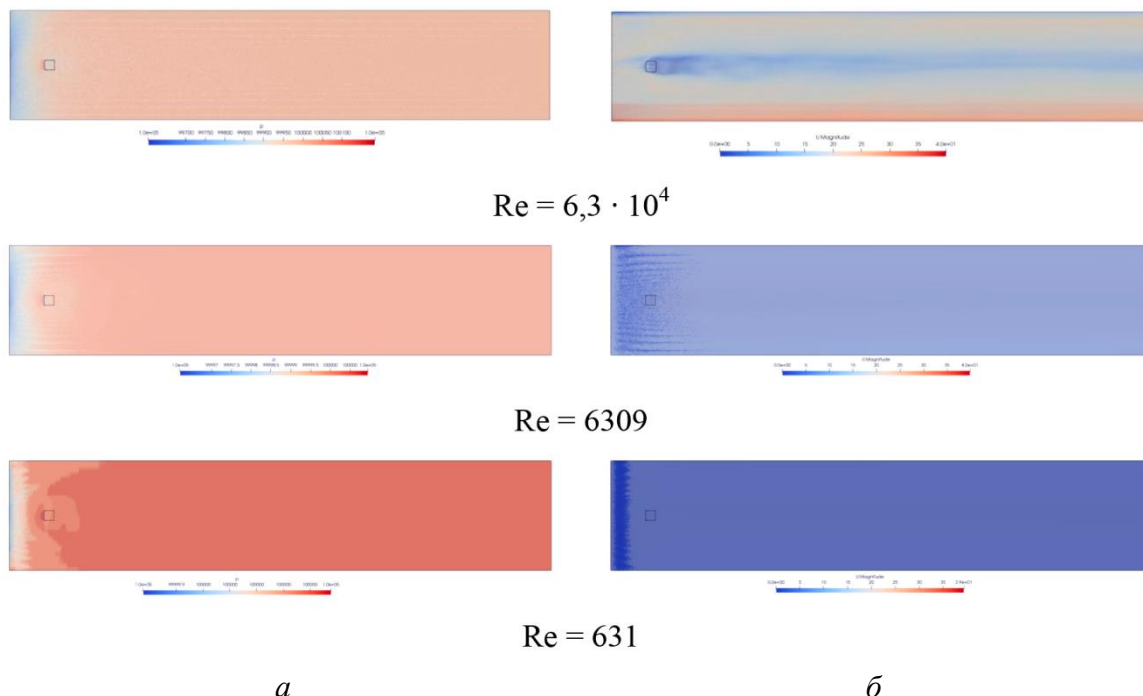


Рис. 3. Поля давления (*a*) и модуля скорости (*б*), полученные для различных скоростей вдува аэровзвеси в рамках подхода Лагранжа

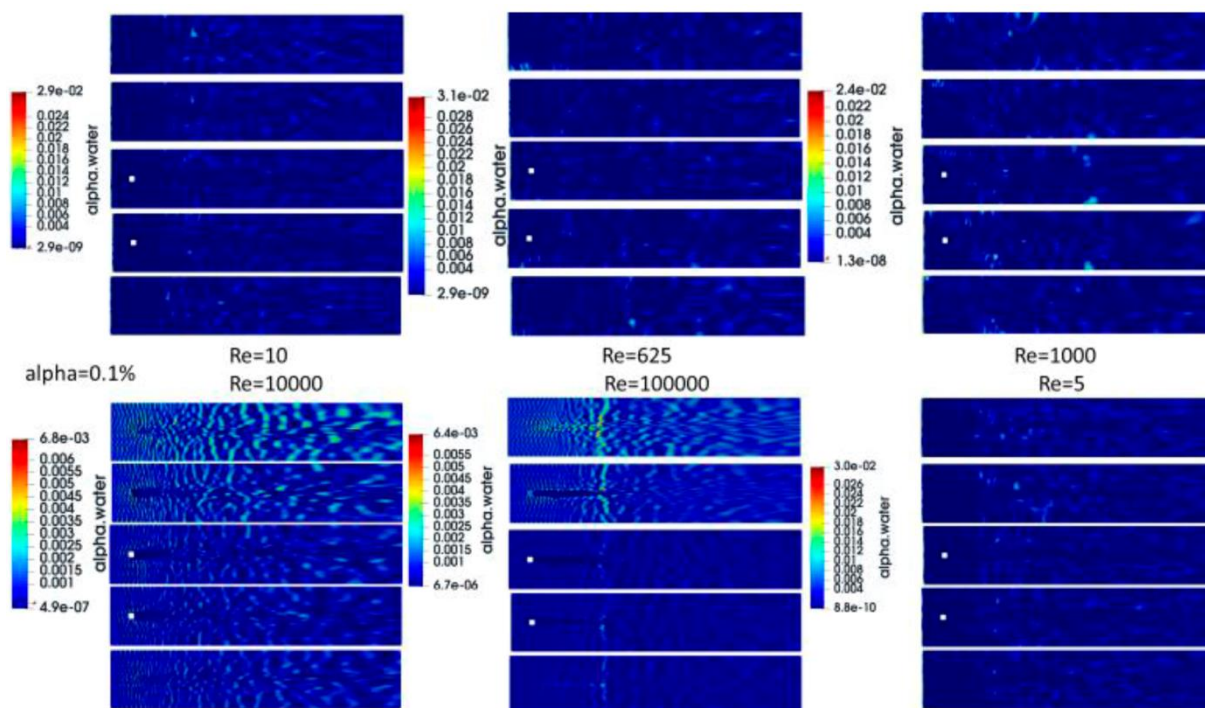


Рис. 4. Поля концентрации воды в продольном сечении, полученные для различных скоростей вдува аэровзвеси

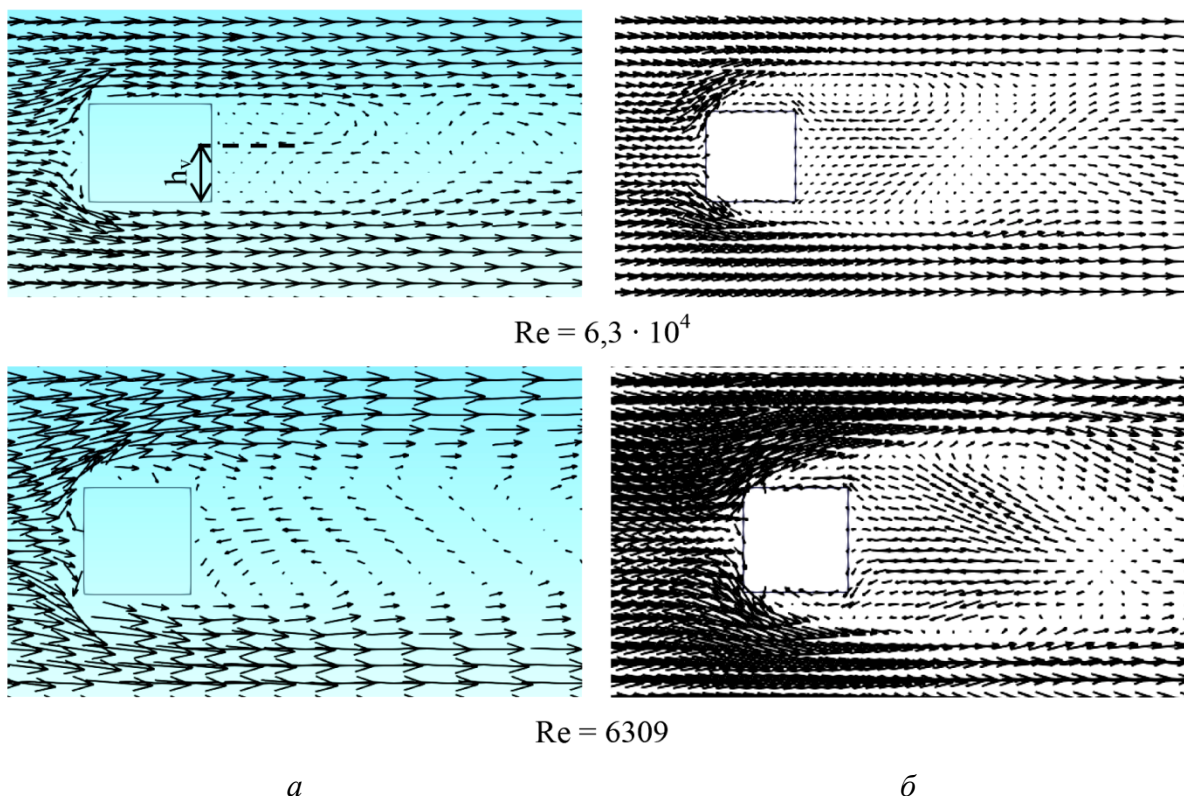


Рис. 5. Векторы скорости потока, полученные для различных скоростей вдува аэровзвеси в рамках методов Эйлера (а) и Лагранжа (б)

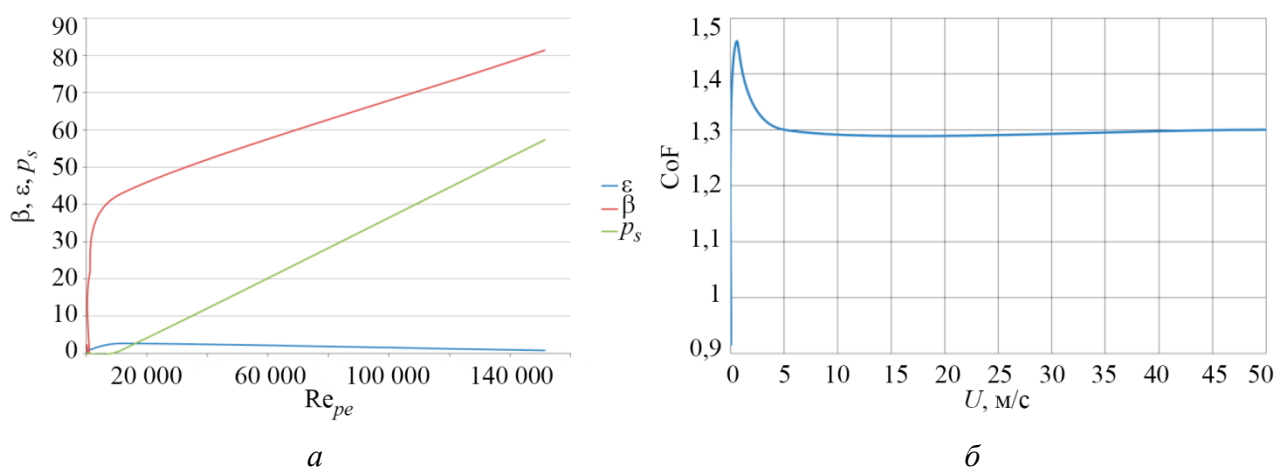


Рис. 6. Зависимость коэффициентов давления (а) и коэффициента гомогенизации (б) от скорости вдува

При этом из рис. 5 видно, что длина ближнего следа (области пониженного давления и вихреобразования за телом) L_s и длина области торможения (перед обтекаемым телом) L_t с увеличением скорости вдува аэровзвеси изменяются согласно соотношениям $L_s = 0,049 \cdot \ln(We_p \cdot CoF/Re_p) + 0,7985$ и $L_t = 0,0902 \cdot \ln(We_p \cdot CoF/Re_p) + 0,94$. Влияние начальной скорости вдува аэровзвеси на среднее значение избыточного давления (p_s), на реализуемый перепад давления в области торможения ($\beta = p_{max}/p_{in}$) и на коэффициент гомогенизации CoF показано на рис. 6.

Дополнительно проведена оценка вычислительных затрат для рассматриваемой пространственной постановки. Установлено, что временные затраты для метода Эйлера (приме-

нение метода Эйлера для описания динамики обеих фаз и их взаимодействия) составляют $O(n)$, а для применения метода Лагранжа – $O(n^2)$.

Анализ полученных полей скоростей и давлений позволил выявить 4 основных режима течения аэровзвеси в зависимости от начальной скорости потока и концентрации фаз примесей. Диаграмма режимов представлена на рис. 7.

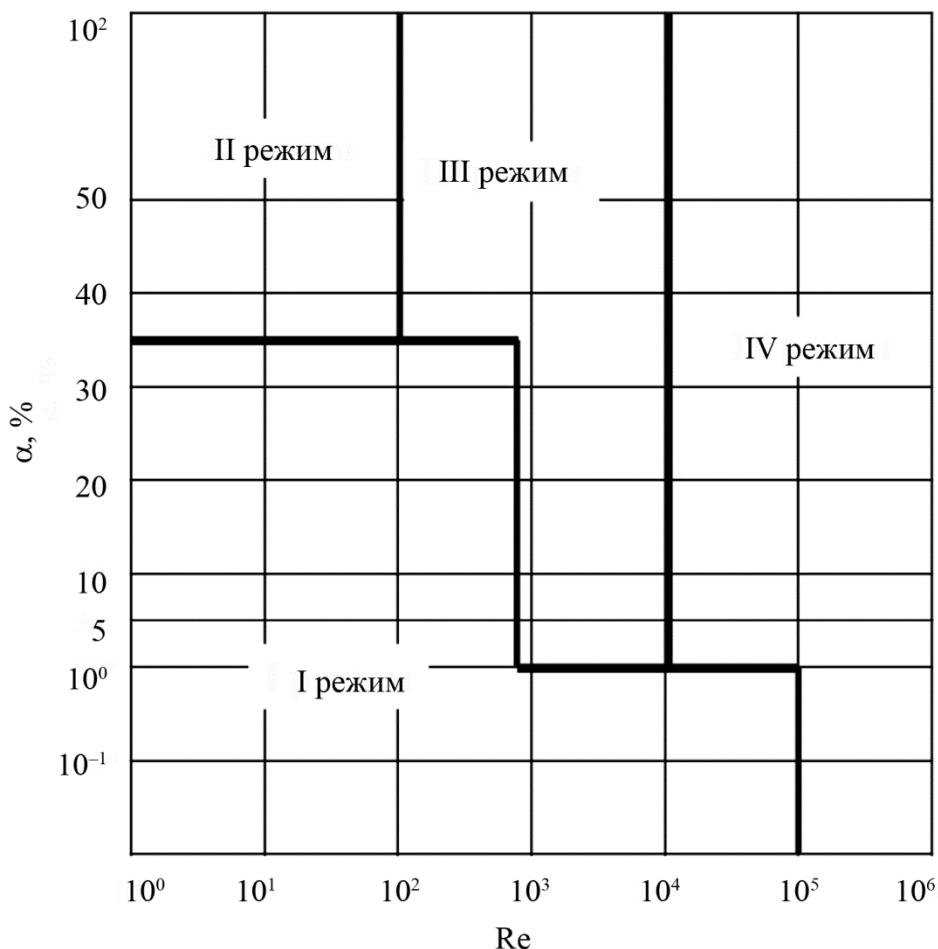


Рис. 7. Диаграмма режимов обтекания куба: I режим – пузырьковое течение с выделением отдельных частиц; II режим – сплошное течение; III режим – образование парной вихревой структуры в ближнем следе; IV режим – турбулизация вихревого следа

Из рис. 7 видно, что именно концентрация водной фазы при скоростях потока, близких к переходной области (область неразвитой турбулентности газовых потоков), определяет характер течения аэровзвеси в ближнем следе.

4. Заключение

В результате работы построены графики изменения критерия гомогенизации в сечении за кубом ($x = 1,1$ м), проанализированы топологические особенности вязкого вихревого следа, формируемого за обтекаемым телом. Установлены критериальные зависимости для оценки положения границы сдвигового течения между вихрями и характерных размеров 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 вих-

ревых структур. Построены диаграммы режимов обтекания тел простой формы многофазным полидисперсным потоком.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00067, <https://rscf.ru/project/25-21-00067>.

Литература

1. Шве́ц А. И., Шве́ц И. Т. Газодинамика ближнего следа. – Киев : Наукова думка, 1976. – 382 с.
2. Гиневский А. С., Желанников А. И. Вихревые следы самолетов. – М. : Физматлит, 2008. – 169 с.
3. Ковеня В. М., Лебедев А. С. Численное моделирование ламинарных и турбулентных течений в следе за телом // Вычислительные технологии. – 1997. – Т. 2 (6). – С. 42–52.
4. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Течение газа с частицами. – М. : Физматлит, 2008. – 600 с.
5. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. – Москва : Изд-во Акад. наук СССР, 1955. – 352 с.
6. 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 // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2015. – Vol. 51 (2). – P. 223–231. – DOI: 10.1134/S0010508215020069.
7. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. – М. : Наука, 1978. – 336 с.
8. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред : в 2 ч. – М. : Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
9. Рахматулин Х. А. Основы газовой динамики взаимопроникающих движений сплошных сред // Прикладная математика и механика. – 1956. – Т. 20 (2). – С. 184–195.
10. Baymetova E. S., Chernova A. A., Shigapova A. R. Numerical modeling of air suspension near-wake dynamics // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2025. – Vol. 21 (3). – P. 321–334. – DOI: 10.20537/nd250702.
11. Особенности формирования вихревого следа в дозвуковом двухфазном потоке / Е. С. Байметова, Е. А. Митрюкова, А. А. Чернова, А. Р. Шигапова // Химическая физика и мезоскопия. – 2025. – Т. 27 (2). – С. 124–133. – DOI: 10.62669/17270227.2025.2.12.