

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИСПЕРСНОЙ ТВЁРДОЙ ФАЗЫ С ТУРБУЛЕНТНЫМИ ВИХРЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ

Чернышов П.С.

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: вихреразрешающие методы, метод крупных вихрей, вихревые турбулентные структуры, численное моделирование, метод дискретных частиц.

Аннотация. В статье рассматривается вопрос влияния твёрдой взвешенной фазы многофазной жидкости на структуру и вид вихревых турбулентных образований несущей среды. Численное моделирование проводится при помощи вихреразрешающего подхода вычислительной газодинамики, что даёт возможность воспроизводить вихревые турбулентные структуры с высокой точностью, разрешая их через полные уравнения Навье-Стокса. Рассматриваемая проблема актуальна в области аддитивных технологий и различных технологических процессах, где происходит взаимодействие твёрдых поверхностей с потоком газопорошковой смеси.

INTERACTION OF THE DISPERSED SOLID PHASE WITH TURBULENT VORTEX STRUCTURES

Chernyshov P.S.

Baltic State Technical University «VOENMEH» n.a. Ustinov D.F., Saint-Petersburg

Keywords: vortex-resolving methods, large eddy simulation, vortex turbulent structures, numerical simulation, discrete particle method.

Abstract. The paper considers the influence of the solid suspended phase of multiphase fluid on the structure and form of vortex turbulent formations of the carrying fluid. Numerical modeling is performed using the vortex-resolving approach of computational gas dynamics, which makes it possible to reproduce the vortex turbulent structures with high accuracy by solving them through the full Navier-Stokes equations. The problem under consideration is relevant in the field of additive technologies and various technological processes, where the interaction of solid surfaces with the flow of gas-powder mixture takes place.

Введение

В настоящее время особую актуальность в технической области приобрели методы аддитивных технологий в производстве изделий. Данная технология позволяет значительно повысить качество, упростить и удешевить производство различных сложных технических изделий [1-3]. Один из наиболее перспективных технологий высокоскоростного изготовления изделий является прямое лазерное выращивание, когда изделие формируется из порошка, подаваемого газопорошковой струёй в зону выращивания изделий. В данной технологии одним из важнейших факторов, влияющим на структуру и свойства спекаемого материала, является качество напыления газопорошковой смеси.

Между тем, течение многофазной газопорошковой смеси и взаимодействие её с твёрдыми стенками является чрезвычайно сложным для аналитического описания физическим явлением. Для описания данного процесса и выявления основных зависимостей, влияющих на структуру движения потока данной смеси,

необходимо прибегать к инструменту численного моделирования газодинамики с учётом сложных вихреразрешающих моделей описания турбулентности потока и применения моделей для моделирования стохастического распределения частиц в потоке струи. Похожие задачи были рассмотрены ранее в работах [4, 5], где структура многофазной струи изучалась применительно к свободным струям в устройстве многорелочной камеры сгорания. Для численного моделирования также использовались вихреразрешающие подходы моделирования и модель дискретной фазы, подразумевающая описание твёрдых дискретных частиц в Лагранжевой системе координат, привязанной к положению частицы в пространстве.

В настоящей работе рассматривается вихревая структура потока и её изменение при взаимодействии с твёрдой взвешенной фазой в задаче натекания многофазной жидкости на стенки плохообтекаемого объекта.

1. Математическая модель и постановка задачи

В численном моделировании газодинамики можно выделить несколько основных подходов описания турбулентных течений: подход в моделировании основанный на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS), метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES), метод прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS) и гибридные методы, которые содержат в себе элементы нескольких представленных ранее методов моделирования.

Из перечисленных методов наибольшее распространение в инженерной практике получил метод RANS (во многом за счет его малых требований к вычислительным ресурсам), однако он имеет целый ряд существенных недостатков. Современные полуэмпирические модели турбулентности плохо учитывают эффекты трёхмерности течения, высокой температуры, сжимаемости, дают менее точные и ограниченные расчётные результаты, чем остальные методы численного моделирования. Также в нём вводится гипотеза о существовании изотропной турбулентности в каждой точке течения, благодаря чему в данном подходе весь спектр турбулентных пульсаций моделируется. Моделирование всего спектра турбулентных пульсаций, а не расчёт их через полные уравнения Навье-Стокса, не позволяет выявлять вихревую структуру течения, которая необходима для рассматриваемой задачи.

Для моделирования данной задачи был выбран метод LES с подсеточной моделью WALE. В основе метода крупных вихрей лежат два предположения. Одно предположение состоит в возможности разделения поля течения на движение крупных и мелких вихрей. Второе предположение заключается в статистической независимости крупных и мелких вихрей. Метод крупных вихрей осуществляется решением полных уравнений Навье-Стокса с исключением мелкомасштабной турбулентности путём операции фильтрации, то есть в отличие от DNS в методе LES уравнения Навье-Стокса рассчитываются только для крупных вихрей, которые несут в себе максимальные рейнольдсовы напряжения и находятся под прямым воздействием граничных условий. Отфильтрованные мелкие вихри, будучи изотропными и имеющими универсальные характеристики, затем моделируются с использованием подсеточной модели.

Модель WALE адаптирована для расчета пристеночных течений, поэтому учитывает как растяжение, так и вращение вихрей, соответствующих разрешимым масштабам скорости. Такая модель обеспечивает затухание вихревой вязкости в пристеночной области в соответствии с асимптотическими соотношениями теории пограничного слоя, а также позволяет избежать использования в явном виде расстояния до стенки. В отличие от широко используемой в вычислительной практике модели Смагоринского, модель WALE позволяет рассматривать течения с ламинарно-турбулентным переходом, обеспечивая более точный расчёт характеристик потока вблизи стенки [6].

Таким образом в подходе LES для описания движения жидкости и газа на крупных неизотропных масштабах турбулентности используется система нестационарных дифференциальных уравнений Навье—Стокса, которая в случае среды с переменной плотностью имеет вид [7]:

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho f_1 - \frac{\partial p}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} V \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho f_2 - \frac{\partial p}{\partial y} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} V \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right], \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho f_3 - \frac{\partial p}{\partial z} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} V \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ρ – плотность среды, t – время, $\bar{V} = (u, v, w)$ – вектор скорости, $\bar{F} = (f_1, f_2, f_3)$ – вектор массовых сил, p – давление в среде, μ – коэффициент динамической вязкости среды.

Представленная выше система уравнений дополняется многофазной моделью Discrete Phase Model (DPM), которая позволяет осуществлять расчёт пространственных траекторий твёрдых частиц в сплошной текучей среде (Лагранжева модель). Данный подход учитывает взаимодействие между непрерывной жидкой и дискретной твёрдой фазами через связь источниковых членов в уравнениях переноса. Также изменение траекторий частиц связано с хаотическим взаимодействием с турбулентными структурами, в том числе это применимо в рамках RANS моделей турбулентности. Применительно к рассматриваемой задаче этот подход позволяет получить стохастическое распределение частиц в рассматриваемом численном пространстве и отследить положение в конкретный момент времени и траекторию каждой дискретной твёрдой частицы.

Основные уравнения динамики движения частиц в Лагранжевых координатах описываются уравнениями 2-4:

$$\frac{d\bar{x}_p}{dt} = \bar{u}_p, \tag{2}$$

$$m_p \frac{d\bar{u}_p}{dt} = \Sigma\bar{F}, \tag{3}$$

$$I_p \frac{d\bar{\omega}_p}{dt} = \Sigma\bar{T}, \tag{4}$$

где \bar{x}_p – положение частицы в Лагранжевой системе координат (СК), \bar{u}_p – скорость движения частицы, m_p – масса частицы, $\Sigma\bar{F}$ – силы, действующие на частицы, $\bar{\omega}_p$ – угловая скорость частицы, $\Sigma\bar{T}$ – моменты вращения, действующие на частицы.

В качестве объекта численного моделирования рассмотрено обтекание многофазного потока твёрдого объекта сферической формы. Для этого была построена цилиндрическая область, в торцевой поверхности которой расположено сопло для моделирования истечения многофазной струи. Внутри цилиндрического численного пространства расположена сфера, на которую происходит натекание потока из сопла. Вид численного пространства представлен на рисунке 1.

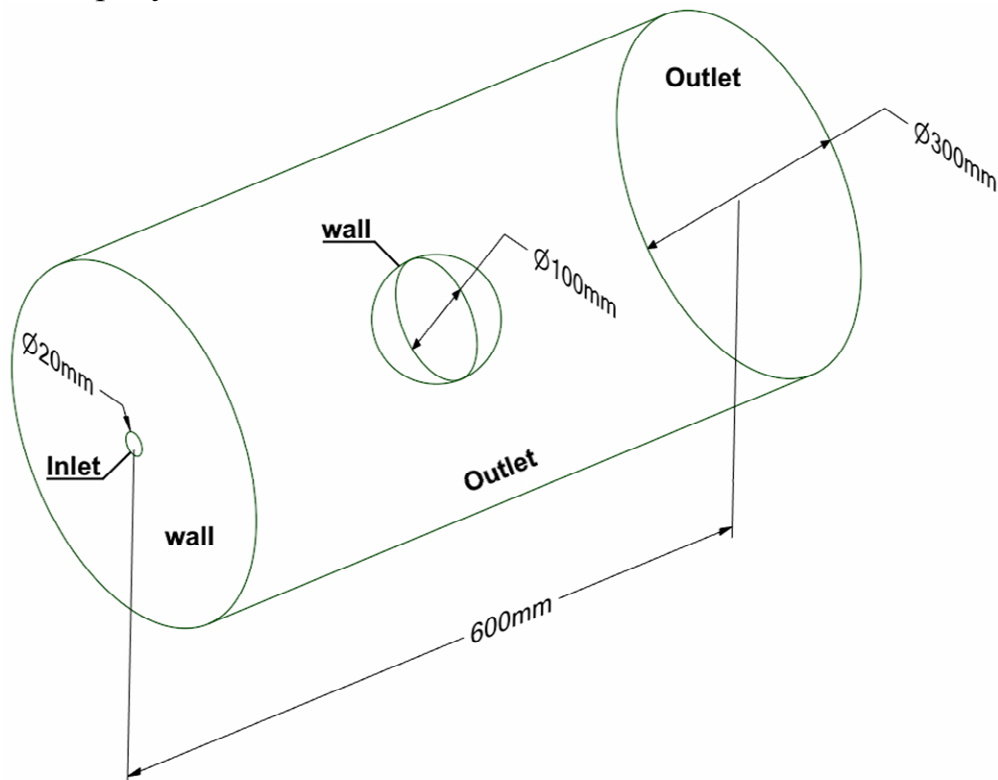


Рис. 1. Численная область расчёта и граничные условия

Длина цилиндрической области составляет 600 мм, диаметр цилиндрической области – 300 мм, входное отверстие для запуска струи имеет диаметр 20 мм, диаметр сферы составляет 100 мм.

На поверхности сферического объекта и передней торцевой поверхности цилиндрической области установлено граничное условие (далее ГУ) липкой и твёрдой стенки. На задней торцевой и боковой поверхностях цилиндрической области поставлено ГУ полного давления на выходе, равного 1 атм. На поверхности выхода из сопла стоит ГУ скорости на входе, равной 15 м/с и нулевого избыточного давления.

При постановке задачи также формулируются свойства твёрдой фазы многофазной жидкости. В частности, задается диаметр твёрдых дискретных сферических частиц, массовый их расход, время генерации твёрдой фазы, начальные параметры и модель их поведения. В данной задаче был задан инерционный характер поведения частиц (наличие массы), задана возможность взаимодействия частиц с несущей фазой потока (зависимость и влияние их аэродинамических параметров), а также учёт аэродинамических сил, действующих на твёрдые частицы. При пересечении выходных границ численной области частицы покидают численную область, при столкновении с твёрдыми стенками – упруго отражаются.

При задании массового расхода и диаметра твёрдой фазы использовалось безразмерное число Стокса St . Число Стокса обычно используется для анализа поведения частиц внутри потока текучей среды. При значениях $St=1$ твёрдые частицы крайне сильно подвержены влиянию движения несущей среды, поэтому траектория их движения имеет слабую инерционность. При значениях $St=1$ – наоборот, частицы сильно инерционны и оказывают сильное влияние на общую структуру текучей среды. Число Стокса St выражается следующим образом:

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_g} = \frac{\rho_p d_p^2 U_0}{18\mu\theta_0}, \quad (5)$$

где τ_p – время аэродинамической реакции частицы, τ_g – характерное время газа, U_0 – начальная скорость струи, θ_0 – начальная ширина потока струи.

Для численного моделирования были выбраны размеры твёрдых частиц d_p , равные 14 и 44 мкм, что при заданных граничных условиях, вязкости среды $\mu = 1.67e-05 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ и плотности твёрдой фазы $\rho_p = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ соответствует числу Стокса $St=1$ и $St=10$. Массовый расход твёрдой фазы задавался в размере 3,5% от массового расхода несущей среды, для случая многофазной жидкости с диаметром частиц 44 мкм также был рассмотрен вариант массовой концентрации частиц 10%. В качестве референсной картины течения была взята картина обтекания несущей среды без твёрдых частиц сферического объекта.

2. Результаты и обсуждение

В результате нестационарного расчета получены мгновенные картины течения и поля газодинамических параметров в пространстве численной области. На рисунке 2 представлено сравнение скоростных полей в продольном осевом сечении численной области в момент времени $t = 0,5 \text{ с}$. На данных рисунках не видно значимых изменений в вихревой структуре потока текучей среды. В случаях с большим числом St наблюдается внесение частицами возмущений в

структуру потока – перед сферой появляется область обратного течения, возникающая в результате упругого отскока частиц от поверхности сферы.

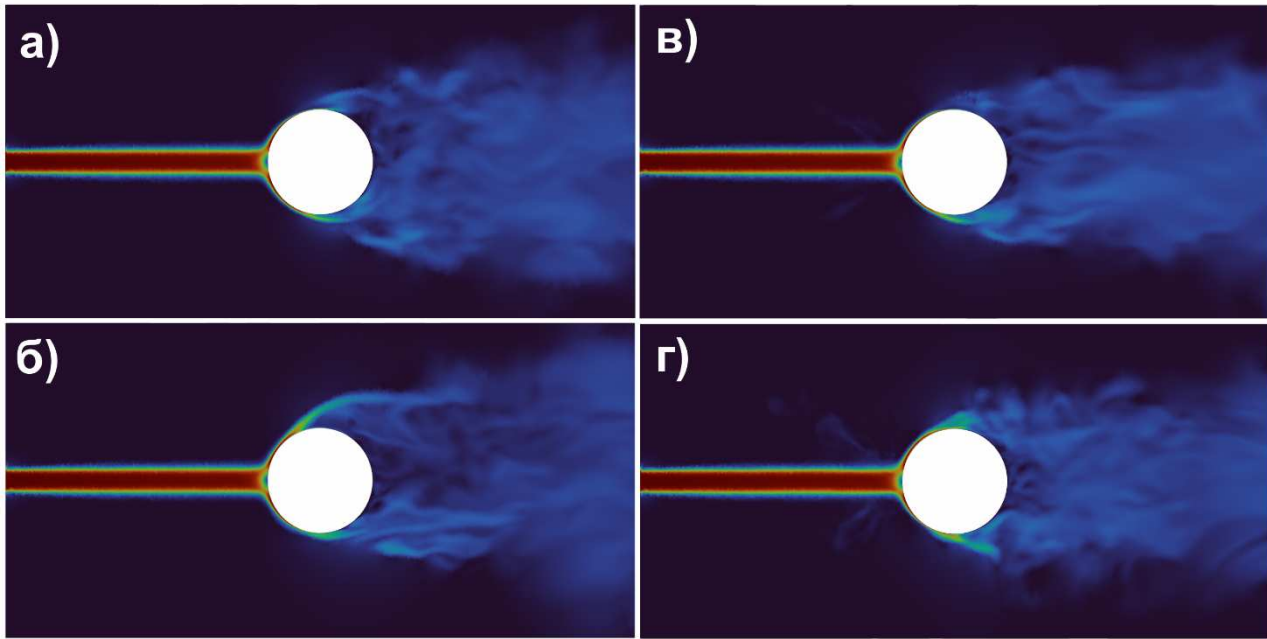


Рис. 2. Поля скорости в осевой плоскости в момент времени $t=0,5$ с (а – течение без частиц, б – течение $St=1$, массовая концентрация 3,5%; в – течение $St=10$, массовая концентрация 3,5%; г – течение $St=10$, массовая концентрация 10%)

Для лучшей визуализации вихревой структуры течения все потоки были представлены через Q-критерий завихренности. Данная визуализация потока представлена на рисунке 3.

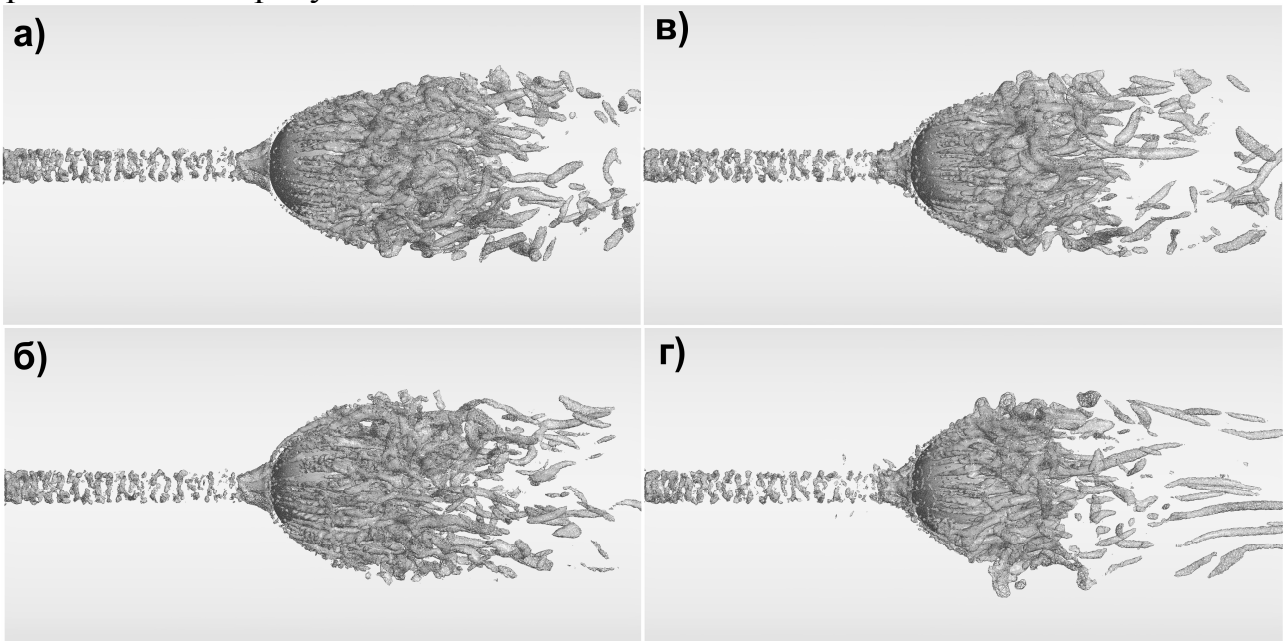


Рис. 3. Вихревые структуры потока в момент времени $t=0,5$ с, визуализированные через Q-критерий (а – течение без частиц, б – течение $St=1$, массовая концентрация 3,5%; в – течение $St=10$, массовая концентрация 3,5%; г – течение $St=10$, массовая концентрация 10%)

По данным визуализациям видно, что структура течения с $St=1$ отличается от структуры течения без частиц крайне незначительно, это может объясняться

тем, что частицы имеют высокую инерционность относительно несущей среды, что и выражается в пренебрежимо малом вносимом в поток возмущении. Поток с числом $St=10$ хоть и похож по структуре, но имеет заметные отличия от случая потока без твёрдой фазы. Турбулентные вихри растягиваются под действием взвешенных дискретных частиц, отрыв потока от поверхности сферы визуально передвигается вперёд, область неустойчивости потока за сферой заметно уменьшается. При увеличении массовой концентрации твёрдой фазы данный эффект усиливается.

Заключение

Многофазные потоки с взвешенными твёрдыми частицами, в частности, используются в технологических процессах при лазерном сплавлении/спекании порошков и различной обработке твёрдых поверхностей. Особенности течения сред данного вида и, в частности, изменение характера их турбулентного движения может существенным образом сказаться на качестве формируемого изделия. Таким образом, крайне важной задачей является численное моделирование данных процессов с применением вихреразрешающих подходов моделирования газодинамики. В частности, таким подходом является метод LES.

Численное моделирование при помощи вихреразрешающих подходов показало, что наличие твёрдой фазы в текучей несущей среде может существенно повлиять не только на вихревые турбулентные структуры течения, но и на общую структуру всего потока. При этом значительную роль имеют параметры твёрдой фазы потока, особенно их инерционность относительно несущей жидкости или газа.

Благодарности

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

Список литературы

1. Armstrong M., Mehrabi H., Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, vol. 86., pp. 1001-1029.
2. Lebedeva E.A., Astaf'eva S.A., Istomina T.S., Trukhinov D.K., Shamsutdinov A.Sh., Strel'nikov V.N., Kukharensko A.I., Zhidkov I.S. Novel approach to recycled carbon fiber suitability assessment for additive technologies // *Applied Surface Science*. 2022, vol. 602.
3. Altıparmak S.C., Yardley V.A., Shi Z., Lin J. Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, vol. 83, pp. 607-636.
4. Sun W., Zhong W., Echehki T. Large eddy simulation of the interactions between gas and particles in a turbulent corner-injected flow // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019, vol. 30, pp. 2139-2149.
5. Sun W., Zhong W., Zhang Y. LES-DPM simulation of turbulent gas-particle flow on opposed round jets // *Powder Technology*. 2015, vol. 270, pp. 302-311.
6. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – Москва: Физматлит, 2008. – 365 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – 676 с.

Сведения об авторах:

Чернышов Павел Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник.