

18. *Dostanko A.P., Avakov S.M., Ageev O.A. [i dr.]. Tekhnologicheskie komplekсы integrirovannykh protsessov proizvodstva izdeliy elektroniki [Technological systems integrated production processes of electronics products]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2016, 251 p.*
19. *Sechenov D.A., Kasimov F.D., Agaev F.G., Svetlichnyy A.M., Ageev O.A. Aktiviruemye protsessy mikroelektronnoy tekhnologii [Activated processes in microelectronic technology]. Baku: Izd-vo ELM, 2000, 258 p.*
20. *Ageev O.A., Dostanko A.P., Tolochko N.K., Bordusov S.V. Intensifikatsiya protsessov formirovaniya tverdotel'nykh struktur kontsentriruyemyimi potokami energii [Intensification of processes of formation of solid structures by the concentrated streams of energy]. Minsk: Bestprint, 2005, 682 p.*
21. *Anshu M.G., Dinesh S.R. Modelling and Eigen frequency analysis of piezoelectric cantilever beam, International Journal of Engineering Science, 2014, Vol. 3, No. 7, pp. 52-59.*
22. *Zhang Y., Murphy K.D. Static and Dynamic Structural Modeling Analysis of Atomic Force Microscope, Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology, 2009, pp. 225-257.*
23. *Shaik R.S., Sai V., Logesh S. Modelling and simulation of cantilever sensor using COMSOL Multiphysics, International Journal of engineering, technology, management and research, 2014, No. 1, pp. 6-8.*
24. *Sader J.E. Parallel beam approximation for V-shaped atomic force microscope cantilever, Review of Scientific Instruments, 1995, Vol. 66, pp. 4583-4587.*
25. *Bykov A.V. Modelirovanie otkloneniya kantilevera na osnove polikristallicheskogo kremniya [Simulation of the polycrystalline siliconcantilever deflection], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 144-153.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т. н. И.Е. Лысенко.

Быков Александр Викторович – ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина»; e-mail: admin@niifp.ru; 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 6; тел.: +74997311306; директор по производству.

Bykov Alexander Victorovich – F.V. Lukin State Research Institute of Physical Problems; e-mail: admin@niifp.ru; Building 6, Passage 4806, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia; phone: +74997311306; Production Director.

УДК 533.6.01

DOI 10.18522/2311-3103-2016-10-138146

А.В. Палий

К ВОПРОСУ О РАЗРЕШЕНИИ ПАРАДОКСА ДАЛАМБЕРА-ЭЙЛЕРА

В статье содержится описание парадокса Даламбера-Эйлера и показывается возможность его раскрытия. Описываются механизмы возникновения вязкости и сопротивления тела в потоке. Приводится современная трактовка парадокса при равномерном и прямолинейном движении тела произвольной формы, но конечных размеров, внутри безграничной несжимаемой жидкости, лишенной вязкости, вихреобразований и поверхностей разрыва скоростей. Для численного решения задачи используется метод конечных объемов и нестационарные уравнения Навье–Стокса. Частные производные аппроксимируются со вторым порядком точности, производные по времени - по неявной схеме Эйлера второго порядка. Таким образом, каждое уравнение в связанном наборе основных уравнений линейризуется неявно, в отношении всех зависимых переменных в наборе. Это приводит к системе линейных уравнений с уравнениями для каждой ячейки, где находится число связанных уравнений в наборе. Целью работы является раскрытие парадокса, в частности для этого применяется конкретный пример обтекания цилиндра газовым потоком. В работе

производится постановка задачи, описывается теория и производится моделирование аэродинамического сопротивления тела в потоке газа, подтверждающее экспериментальные данные литературных источников о распределении давления в системе тело-поток, также показаны ошибки при составлении условий обтекания тела потоком при которых и возникает сам парадокс и в итоге делается вывод о возможности его раскрытия при устранении описанных ошибок.

Газовый поток; сопротивление тела; обтекание тела; поверхность тела; парадокс Даламбера-Эйлера.

A.V. Paliy

ACCORDING THE QUESTION OF PARADOX DALEMBERT-EULERS PERMISSION

The Dalember-Eulers paradox is described. The possibility of paradox disclosure is shown in this article. The mechanisms of viscosity and the body resistance in the flow are described. The modern paradox interpretation in equable and rectilinear motion of body with arbitrary shape but finite size inside infinite incompressible fluid devoid of viscosity and vortex formation, and velocities abruptness surfaces discontinuity is presented. The method of finite volumes and the nonstationary Navier-Stokes equations are used for the numerical decision of the task. Partial derivatives are approximated by the second order of accuracy, derivatives on time are approximated by the Euler implicit scheme with the second order. Thus, each equation in the connected set of the equations is linearized implicitly, concerning all dependent variables in a set. It leads to a linear equation system with the equations for each cell where there is a number of the connected equations in a set. The purpose of article is disclosure of a paradox. In particular the specific example of a cylinder flow by a gas is used for this. The problem definition and theory are described. The simulation of body aerodynamic resistance in a gas flow is considered. It confirms the experimental data about pressure distribution in system body-flow. We showed the errors in conditions of body flow when the paradox appeared. We concluded about possibility of its disclosure by correction of described errors.

Gas flow; body resistance; flow around body; body surface; the Dalember-Eulers paradox.

Введение. В 1742 году петербургский академик Л. Эйлер рассчитал сопротивление цилиндра, равномерно движущегося в жидкости, лишенной трения, и получил результат – сила аэродинамического сопротивления оказалась равной нулю. Спустя семь лет выдающийся французский механик Ж. Даламбер с помощью некоторых дополнений рассчитал обтекание произвольного тела конечного объема и получил все тот же результат – нулевое сопротивление. Если тело движется с постоянной скоростью сквозь жидкость без вязкости и без турбулентности, то жидкость будет обтекать тело, не оказывая ему в целом никакого сопротивления (в гидроаэродинамике это явление получило название парадокса Даламбера-Эйлера, который в последствии стал одним из первых и основных законов движения жидкости и газа).

В современной трактовке парадокс Даламбера-Эйлера звучит так – положение гидродинамики, согласно которому при равномерном и прямолинейном движении тела произвольной формы, но конечных размеров, внутри безграничной несжимаемой жидкости, лишенной вязкости, вихреобразований и поверхностей разрыва скоростей, результирующая сила сопротивления жидкости движению тела равна нулю (высказано Ж. Даламбером в 1744 и Л. Эйлером в 1745). Парадокс был доказан вначале для тел симметричной формы (рис. 1), а так же и для идеального совершенного газа и оставался нераскрытым по сей день [1–3].

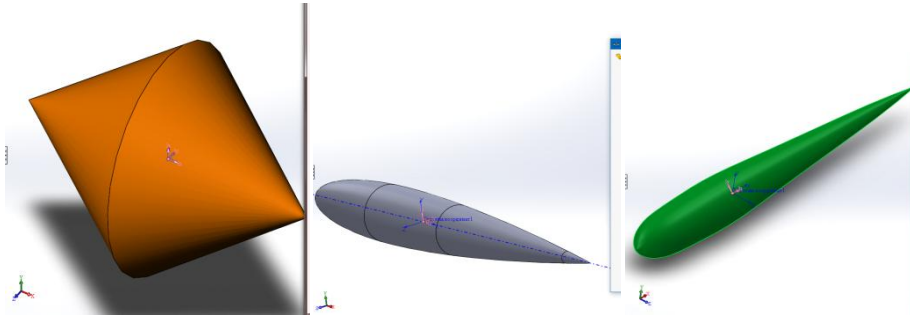


Рис. 1. Симметричные обтекаемые тела

Постановка задачи. В данной работе приводится трактовка парадокса Даламбера-Эйлера, связанная с отсутствием аэродинамического сопротивления при обтекании тела потоком газа. Задача разрешения парадокса состоит в корректировке начальных и граничных условий для традиционных дифференциальных уравнений, описывающих процессы массопереноса в системе тело-поток. Изложенные в литературных источниках данные дают полное представление об условиях возникновения парадокса, но отсутствует информация о возможности его разрешения [4–6]. Предложенный метод разрешения парадокса, в отличие от описанных, заключается в правильном задании начальных и граничных условий при аэродинамическом обтекании тела, что и показано в работе. Устранив ошибки в граничных условиях системы тело-поток, в условиях возникновения и существования самого потока, в описании процесса возникновения аэродинамического сопротивления тела в потоке мы разрешим парадокс. Традиционно для численного решения задачи используется метод конечных объемов и нестационарные уравнения Навье-Стокса [3–6]. Частные производные аппроксимируются со вторым порядком точности, производные по времени – по неявной схеме Эйлера второго порядка. Для расчета используется пакет Density-Based. Таким образом, каждое уравнение в связанном наборе основных уравнений линеаризуется неявно, в отношении всех зависимых переменных в наборе. Это приводит к системе линейных уравнений с уравнениями для каждой ячейки, где находится число связанных уравнений в наборе. Уравнение для сохранения массы, или уравнение непрерывности, может быть записано следующим образом [7–9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}) = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) это общий вид уравнения сохранения массы и справедливо как для несжимаемых, так и сжимаемых потоков. Для 2D осесимметричной геометрии уравнение неразрывности будет иметь вид [10–12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0, \quad (2)$$

где x – осевая координата, r – радиальная координата, v_x – осевая скорость, и v_r – радиальная скорость.

Уравнение сохранения импульса имеет вид [13–15]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{v}) + \nabla(\rho \bar{v} \bar{v}) = 0, \quad (3)$$

где p – статическое давление.

Для расчета и моделирования используется стандартная k-ε модель пакета ANSYS Fluent.

Коэффициент лобового сопротивления для тела может быть найден из уравнения [13–15]:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, \quad (4)$$

где a_1 , a_2 , a_3 – константы зависящие от изменения числа Рейнольдса Re .

Теория. Физически отсутствие сопротивления объясняется тем, что поток жидкости или газа, обтекая тело и замыкаясь позади, оказывает на переднюю часть воздействие уравновешиваемое воздействием на заднюю. В действительности же тело при своем движении в жидкости или газе всегда испытывает сопротивление [16–20].

В жидкости и твердых веществах существуют силы межмолекулярных связей, в газах они отсутствуют и проявляются при столкновениях. На тех же средних расстояниях, на которых находятся молекулы газа друг от друга, и при тех энергиях, которыми они обладают, нет никакого смысла о них говорить, по крайней мере, в рамках аэродинамики [4–6].

Образование вихрей или турбулентностей, приводит к уменьшению силы, действующей на тело со стороны потока. И если бы она была равна нулю при ламинарном потоке, то при турбулентности стала бы отрицательной, что невозможно. Газ невязкий, и удовлетворяет условиям Даламбера-Эйлера, но газ не течет по необходимым траекториям, огибая тело (молекулы газа движутся по ломанным прямым, но никак не по кривым). Впрочем, до определенного предела, понятиями поток и линия тока вполне допустимо пользоваться если считать, что вдоль линий тока движутся не отдельные молекулы, а группа, заключенная в некотором объеме ΔV . При этом отдельные молекулы могут покидать объем, или наоборот. Сам объем ΔV может меняться, так как внутри него может меняться температура, плотность и давление. В отсутствии вязкости, то есть в отсутствии сил притяжения, или сил связи, когда, потянув за одну молекулу, мы потянем и рядом стоящую, на тело в потоке не действуют никакие силы кроме сил давления. Просчитав или просуммировав их по всей поверхности тела, и получив некоторую результирующую силу, мы и получим силу, с которой поток противодействует телу, а тело потоку.

Нуль, связанный с силами давления, однако существует. Если решить задачу обтекания тела ламинарным потоком, и подсчитать все силы давления отдельно для передней и задней частей тела, относительно некоторой плоскости, для симметричных тел относительно плоскости симметрии, то в передней части мы получим избыточное давление и суммарную силу \bar{F} (рис. 2).

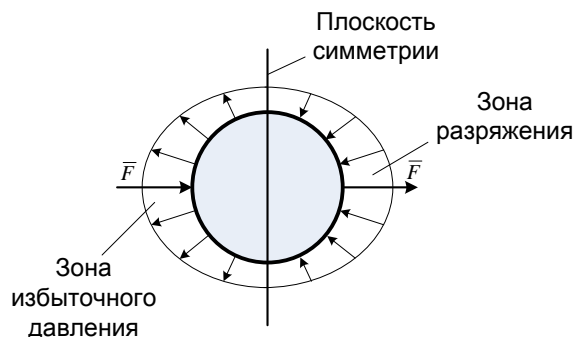


Рис. 2. Зоны давлений относительно плоскости симметрии

Позади же тела будет зона пониженного давления, относительно давления в потоке, в плоскости симметрии. Сила же будет абсолютно равна силе \bar{F} . Если силы складывать как давления, то мы естественно получим нуль. Но к телу они приложены однонаправлено, одни как бы толкают тело, а другие «тянут» его, и в сумме будет $2\bar{F}$. Таким образом, с потоком ничего не происходит. Часть молекул перетекает из зоны высокого давления в зону низкого, но паритет тут же восстанавливается.

Рассмотрим задачу об обтекании цилиндра идеальной жидкостью. Скорость потока вблизи поверхности цилиндра от точки 1 до точки 3 меняется по закону синуса, с максимумом в точке 2 (рис. 3).

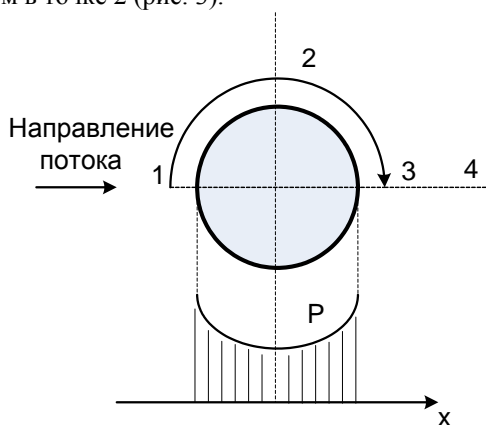


Рис. 3. Изменение скорости потока вблизи поверхности цилиндра

Далее вычисляется распределение давления по контуру цилиндра на основе интеграла Бернулли. Сумма давлений справа и слева от цилиндра равны, следовательно, суммарная сила, действующая со стороны потока на цилиндр, равна нулю. Кривую давлений на (рис. 3) следует изменить чтобы сила давления оказывала давление на тело в потоке, что подтверждается экспериментом.

Зона 1-2, ни по скорости, ни по распределению давления вопросов не вызывает. Единственное, чего не следует путать, это причинно-следственные связи. Не давление падает потому что в этом направлении течет газ, а газ течет в этом направлении, потому что там давление ниже. В зоне же 2-3 поток движется как и рассчитано в направлении от точки 2 к точке 3, но при этом, в отличие от зоны 1-2, поток движется в сторону высокого давления. Это невозможно.

В газе не могут возникать возмущения (перепады) плотности или соответственно давлений сами по себе, или беспричинно. Происходит это потому что, если случайно где-либо в газе (в некоторой области) возникнет, скажем, разрежение, то молекулы со скоростью звука займут эту пустоту. Так возникает поток молекул в сторону пустоты.

Если мы имеем некое тело – диффузор или мембрану, движущееся в воздухе (применительно к звуку чаще говорят колеблющееся), то впереди (по ходу) создается избыточное давление, а позади – разрежение. Если поток воздуха успевает обогнуть тело (перетечь из зоны высокого давления в зону низкого давления), то больше ничего не происходит. Если же не успевает, то образуется так называемая звуковая волна, то есть этот перепад давления распространяется в воздухе.

Моделирование. В программном комплексе SolidWorks были разработаны трехмерные модели исследуемых геометрий.

В программном комплексе Ansys Workbench были созданы файлы проектов, объединяющие в себе все необходимые комплексы, для исследования аэродинамических характеристик объектов.

Посредством DesignModeller полученные геометрии были импортированы в Workbench, там же были разработаны рабочие области, на два порядка превышающие размер созданных объектов. Размер расчетной области 2000*2000*2000 мм. Такой объем рабочей области позволяет более наглядно оценить распределение аэродинамических потоков в окрестностях рассматриваемого объекта.

Полученная геометрия рабочей области в дальнейшем была преобразована в сеточную структуру где при помощи программного компонента Ansys Meshing была создана расчетная сетка. Данный этап проводился идентичным образом для всех рассматриваемых геометрий.

Все разработанные сеточные геометрии имеют 5 уровней пристеночных слоев (рис. 4).

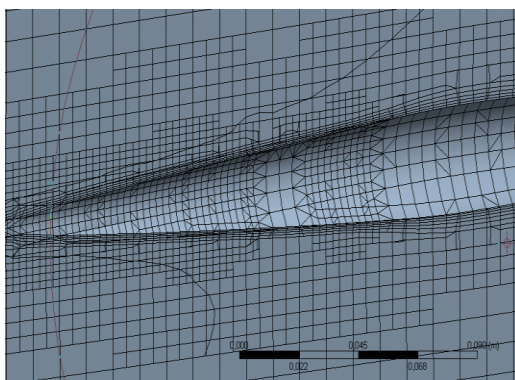


Рис. 4. Уровни пристеночных слоев сеточной геометрии

Пример распределения давления приведен на рис. 5.

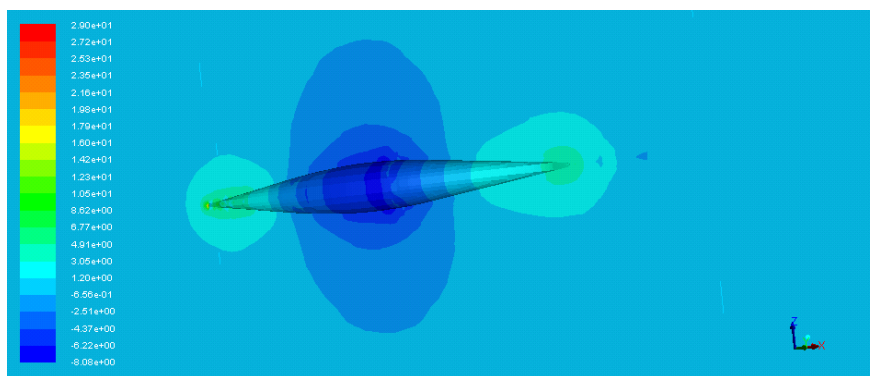


Рис. 5. Распределение давления аэродинамического потока при обтекании тела

Основные выводы. В работе был сформулирован и разрешен парадокс Даламбера-Эйлера. Была произведена постановка задачи, описана теория и произведено моделирование аэродинамического сопротивления тела в потоке газа, подтверждающее экспериментальные данные литературных источников о распределении давления в системе тело-поток.

В отличие от объяснений возникновения парадокса в литературных источниках показано, что парадокс можно разрешить, устранив ошибки в описании процесса возникновения сопротивления в системе тело-поток. Газ не может течь в сторону высокого давления. Если поток течет из точки 2 в точку 3, то давление в точке 3 ниже (рис. 3). Для обеспечения условий существования потока должна существовать разница давлений между плоскостями ...1,2,3,4... (рис. 3), причем большее давление должно быть слева. Чем больше ΔP , тем больше и поток.

Таким образом, устранив вышеописанные ошибки при описании явления обтекания тела потоком газа мы разрешим парадокс Даламбера-Эйлера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Палий А.В. Массоперенос и основное уравнение аэродинамики. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 192 с.
2. Палий А.В., Панатов Г.С. Температура и теплоперенос. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 132 с.
3. Палий А.В., Замков Е.Т. Определение газа как невязкого вещества на основании утверждений Гельмгольца и Ньютона // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1 (138). – С. 190-196.
4. Палий А.В., Замков Е.Т., Булейко В.Г. Механизм создания сопротивления плоской поверхности в газовом потоке тангенциальной составляющей скорости молекулы газа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1 (138). – С. 197-202.
5. Палий А.В., Замков Е.Т., Серба П.В. Определение толщины пограничного слоя при обтекании тела аэродинамическим потоком методом электростатической аналогии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 192-197.
6. Палий А.В., Замков Е.Т. Механизм возникновения трения и сопротивления тела в газовом потоке // Известия ЮФУ. Технические науки – 2012. – № 1 (126). – С. 186-191.
7. Бондарев Е.Н. и др. Аэрогидромеханика. – М.: Машиностроение, 1993. – 603 с.
8. Аэродинамика / под ред. Калугина В.Т. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 687 с.
9. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 143 с.
10. Гарбарук А.В. Конспект лекций дисциплины «Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений». – СПб., 2010. – 127 с.
11. Антонов В.А., Гришин А.М., Пахомов Ф.М. Влияние угла атаки на сверхзвуковое обтекание осесимметричных затупленных тел при наличии вдува с поверхности // Известия АН СССР. МЖГ. – 1987. – № 5. – С. 95-101.
12. Антонов В.А., Гольдин В.Д., Пахомов Ф.М. Аэродинамика тел со вдувом. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 1990. – 192 с.
13. Пахомов Ф.М. Аэродинамика затупленного конуса при пространственном взаимодействии с нагретой областью в сверхзвуковом потоке в отсутствие и при наличии вдува с поверхности // Известия РАН. МЖГ. – 2003. – № 1. – С. 147-153.
14. Никитин Г.А., Баканов Е.А. Основы авиации: учеб. для вузов гражданской авиации. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1984. – 261 с.
15. Гарбузов В.М., Ермаков А.Л., Кубланов М.С., Ципенко В.Г. Аэромеханика: учеб. для студентов вузов. – М.: Транспорт, 2000. – 287 с.
16. Бочкарев А.Ф., Андреевский В.В., Белоконов В.М. и др. Аэромеханика самолета: Динамика полета: учеб. для авиационных вузов / под ред. А.Ф. Бочкарева и В.В. Андреевского. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.
17. Колесников Г.А., Марков В.К., Михайлюк А.А. и др. Аэродинамика летательных аппаратов: учеб. для вузов по специальности «Самолетостроение» / под ред. Г.А. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1993. – 544 с.
18. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. – Ульяновск: УлГТУ, 1996. – 246 с.
19. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 319 с.
20. Ретик Е.У., Соседко Ю.П. Турбулентный пограничный слой. Методика и результаты турбулентных исследований. – М.: Физматлит, 2007. – 306 с.

REFERENCES

1. Paliy A.V. Massoperenos i osnovnoe uravnenie aerodinamiki [Mass transfer and basic equations of aerodynamics]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2012, 192 p.
2. Paliy A.V., Panatov G.S. Temperatura i teploperenos [Temperature and heat transfer]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 132 p.
3. Paliy A.V., Zamkov E.T. Opredelenie gaza kak nevyazkogo veshchestva na osnovanii utverzhdennykh Gel'mgol'tsa i N'yutona [Determination of the gas as a non-viscous matter on the basis of representations Helmholtz and Newton], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 1 (138), pp. 190-196.
4. Paliy A.V., Zamkov E.T., Buleyko V.G. Mekhanizm sozdaniya soprotivleniya ploskoy poverkhnosti v gazovom potoke tangentsial'noy sostavlyayushchey skorosti molekuly gaza [Mechanism of body friction and resistance in the gas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 1 (138), pp. 197-202.
5. Paliy A.V., Zamkov E.T., Serba P.V. Opredelenie toshchiny pogranichnogo sloya pri obtekanii tela aerodinamicheskim potokom metodom elektrostatoicheskoy analogii [Definition of the interface thickness for aerodynamic stream flow round a body by the method of electrostatic analogies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 192-197.
6. Paliy A.V., Zamkov E.T. Mekhanizm vozniknoveniya treniya i soprotivleniya tela v gazovom potoke [The body resistance creation mechanism by the tangential component of a gas molecule speed in a gas stream], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 186-191.
7. Bondarev E.H. i dr. Aerogidromekhanika [Aerohydrodynamics]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 603 p.
8. Aerodinamika [Aerodynamics], ed. by Kalugina V.T. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2010, 687 p.
9. Belov I.A., Isaev S.A. Modelirovanie turbulentnykh techeniy: ucheb. posobie [Simulation of turbulent flows: training manual]. St. Petersburg: Balt. gos. tekhn. un-t, 2001, 143 p.
10. Garbaruk A.B. Konspekt lektsiy distsipliny «Techniya vyazkoy zhidkosti i modeli turbulentnosti: metody rascheta turbulentnykh techeniy» [Lectures disciplines "viscous Flow and makes the tour bulletnose: calculation methods for turbulent flows"]. St. Petersburg, 2010, 127 p.
11. Antonov V.A., Grishin A.M., Pakhomov F.M. Vliyaniye ugla ataki na sverkhzvukovoye obtekanie osesimmetrichnykh zatuplennykh tel pri nalichii vduva s poverkhnosti [The effect of angle of attack on supersonic flow over axisymmetric blunt bodies in the presence of the injection surface], *Izvestiya AN SSSR. MZhG* [A Journal of USSR Academy of Sciences. Fluid Dynamics], 1987, No. 5, pp. 95-101.
12. Antonov V.A., Gol'din V.D., Pakhomov F.M. Aerodinamika tel so vduvom [Aerodynamics of bodies with injection]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta. 1990, 192 p.
13. Pakhomov F.M. Aerodinamika zatuplennogo konusa pri prostranstvennom vzaimodeystvii s nagretoy oblast'yu v sverkhzvukovom potoke v otsutstvie i pri nalichii vduva s poverkhnosti [Aerodynamics of a blunt cone with a spatial interaction with the heated region in a supersonic flow in the absence and in the presence of the injection surface], *Izvestiya RAN. MZhG* [A Journal of Russian Academy of Sciences. Fluid Dynamics], 2003, No. 1, pp. 147-153.
14. Nikitin G.A., Bakanov E.A. Osnovy aviatsii: ucheb. dlya vuzov grazhdanskoy aviatsii [Fundamentals of aviation: textbook for higher educational institutions of civil aviation]. 2nd ed. Moscow: Transport, 1984, 261 p.
15. Garbuzov V.M., Ermakov A.L., Kublanov M.S., Tsipenko V.G. Aeromekhanika: ucheb. dlya studentov vuzov [Aeromechanics: a textbook for University students]. Moscow: Transport, 2000, 287 p.
16. Bochkarev A.F., Andreevskiy V.V., Belokonov V.M. i dr. Aeromekhanika samoleta: Dinamika poleta: ucheb. dlya aviatsionnykh vuzov [Aeromechanics of airplane: flight Dynamics: proc. for aviation higher education institutions], ed. by A.F. Bochkareva i V.V. Andreevskogo. 2nd ed. – Moscow: Mashinostroenie, 1985, 360 p.
17. Kolesnikov G.A., Markov V.K., Mikhaylyuk A.A. i dr. Aerodinamika letatel'nykh apparatov: ucheb. dlya vuzov po spetsial'nosti «Samoletostroenie» [Aerodynamics of aircraft: textbook. for high schools on specialty "Aircraft"], ed. by G.A. Kolesnikova. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 544 p.
18. Koval'nogov N.N. Pogranichnyy sloy v potokakh s intensivnymi vozdeystviyami [Boundary layer flows with intense impacts]. Ul'yanovsk: UIGTU, 1996, 246 p.

19. Kutateladze S.S., Leont'ev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranchnom sloe* [Heat and mass transfer and friction in a turbulent boundary layer]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 319 p.
20. Repik E.U., Sosedko Yu.P. *Turbulentnyy pogranchnyy sloy. Metodika i rezul'taty turbulentnykh issledovaniy* [A turbulent boundary layer. The methodology and results of turbulent research]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 306 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.С. Панатов.

Палий Александр Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: a.v._paliy@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; к.т.н.; кафедра конструирования электронных средств; доцент.

Paliy Alexander Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: a.v._paliy@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; lecturer.

УДК 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2016-10-146158

С.А. Ховансков, В.А. Литвиненко, В.С. Хованскова

АЛГОРИТМ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ*

В настоящее время разработке методов организации распределенных вычислений уделяется много внимания. Одним из методов создания распределенных вычислений является использование многоагентной системы. При организации распределенных вычислений на основе обычных сетевых компьютеров могут возникать угрозы безопасности выполняемых вычислительных процессов. Авторами разработан единый алгоритм агентов системы управления работой вычислительных узлов сети. В качестве вычислительных узлов используются персональные компьютеры, объединенные в сеть. Предлагаемый алгоритм управления агентом системы позволяет организовать использование агентами вычислительных мощностей своих компьютеров сети для решения большеобъемных задач путём создания безопасных распределенных вычислений. Агенты, управляющие сетевыми компьютерами, могут: организовать распределенную вычислительную систему, распределить вычислительную нагрузку между компьютерами управляемыми агентами, выполнить оптимизацию вычислительной нагрузки в зависимости от вычислительной мощности компьютеров. В ходе выполнения вычислений количество компьютеров, включенных в многоагентную систему, может увеличиваться без участия внешней управляющей системы. Это происходит за счет подключения новых компьютеров к вычислительной системе путем передачи им агентов, что приводит к увеличению вычислительной мощности системы. Благодаря разработанному алгоритму агента, организуемые безопасные распределенные вычисления позволяют сократить общее время решения большеобъемных задач. Организуемое алгоритмом взаимодействие агентов повышает отказоустойчивость (живучесть) вычислительных процессов в условиях нестабильности внутренней и внешней вычислительной среды (изменение количество работающих сетевых компьютеров). При отсутствии угрозы безопасности вычислениям многоагентная система способна выполнять перечисленные функции без управляющего центра. В случае наличия угрозы в децентрализованную многоагентную систему для повышения степени ее безопасности добавляется несколько «центральных» агентов, алгоритм работы которых усложнен по сравнению с другими агентами. Под управлением разработанного алгоритма агенты выполняют обнаружение случаев фальсификации результатов работы распределенной системы, которые могут привести к принятию неправильных решений.

Распределенные вычисления; многоагентная система; безопасность вычислений; защита работоспособности.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-01-00665).