

УДК 533.682

В. В. Вышинский, М. А. Кудров

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Моделирование атмосферных течений над горным рельефом

На примере горного аэродрома демонстрируется технология моделирования атмосферных течений над горным ландшафтом в районе выполнения полётов. Полученные результаты использованы при создании модели динамики самолёта МиГ-29 на пилотажном стенде РСК «МиГ».

Ключевые слова: безопасность полёта, горный аэродром, модели атмосферы, сеточные методы, краевые условия, профиль скорости ветра.

V. V. Vyshinsky, M. A. Kudrov

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

Simulation of atmospheric flows over mountain relief

The technology of the simulation of atmospheric flows over mountain terrain in the area of flight operations is demonstrated on the example of a mountain aerodrome. The obtained results are used to develop a model of aircraft MiG-29 dynamics on the flight simulator of Russian Aircraft Corporation «MiG».

Key words: flight safety, mountain aerodrome, atmospheric models, grid methods, boundary conditions, profile of the wind speed.

1. Введение

Незнание состояния и поведения атмосферы над горным рельефом, неготовность пилотов к полётам в условиях орографической турбулентности приводят к лётным происшествиям и катастрофам [1–3].

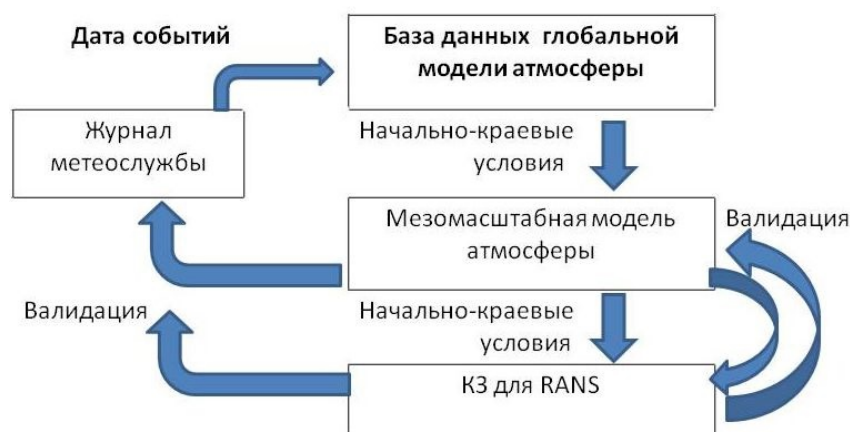


Рис. 1. Технология моделирования

Для подготовки пилотов к полётам в условиях орографической турбулентности необходимы авиатренажеры и пилотажные стенды, моделирующие воздействие на самолёт турбулентных порывов. Для этого нужны надежные математические модели, адекватно воспроизводящие атмосферные течения в рамках краевых задач для соответствующих уравнений,

причём сложность постановки задач должна соответствовать уровню точности и подробности имеющихся граничных условий. Таким образом, моделирование атмосферных течений над горным рельефом и учёт атмосферного фактора в моделях динамики авиационных тренажёров является актуальной задачей.

В предлагаемой технологии моделирования атмосферных течений в качестве начально-краевых условий используются данные о состоянии атмосферы, полученные из мезомасштабной модели атмосферы, для запуска которой используется база данных глобальной модели атмосферы. Выбор характерных сценариев и даты моделирования производится на основании анализа журнала метеослужбы аэродрома (рис. 1). Результаты моделирования в мезомасштабной модели и в рамках краевой задачи в зоне аэропорта сравниваются между собой и с записями журнала метеослужбы аэропорта.

2. Постановка задачи

Решается краевая задача для осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) с моделью турбулентности SST. Полная система уравнений приведена в работе [4]. Для постановки граничных условий необходимо задать профили скорости ветра, температуры, энергии турбулентности и скорости её диссипации в зависимости от высоты над землей z .

При этом следует помнить, что турбулентные течения являются неньютоновой жидкостью. Вопрос справедливости уравнений Навье–Стокса (линейная связь между тензорами скоростей деформаций и напряжений) при возникновении турбулентности остаётся открытым.

Осреднение по Рейнольдсу опирается на гипотезу эргодичности: вместо интегрирования по пространству (спектров по пространству) выполняется интегрирование по времени (спектры по времени). В соответствии с гипотезой эргодичности осреднение по ансамблю из N реализаций заменяется осреднением по времени, где интервал осреднения существенно превышает характерное время энергосодержащих турбулентных пульсаций и много меньше характерного времени осредненного течения. Гипотеза эргодичности нарушается, по крайней мере, в ходе обратного каскадного процесса формирования крупных атмосферных вихрей. Таким образом, решается краевая задача, не имеющая доказательства корректности, и валидация численного метода строго обязательна.

Вопрос корректности разностной задачи для уравнений Навье–Стокса остается открытым из-за неясности граничных условий. Известны примеры неединственности численных решений из-за численной постановки граничных условий. Физически необоснованные и математически необоснованные граничные условия могут приводить к неустойчивости численного решения (например, на выходной границе). Всё это обуславливает необходимость верификации численной схемы.

В тех случаях, когда мезомасштабная модель атмосферы для данного участка земной поверхности не может быть запущена, а также для верификации численной схемы, могут понадобиться профили атмосферных параметров, заданные аналитически.

По результатам проведенного обзора литературы [5–9 и др.] и численных исследований получено, что наиболее подходящий профиль скорости ветра выражается системой (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{k_1}{\chi^2} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \cos(\alpha), \\ v = \frac{k_1}{\chi^2} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \sin(\alpha), \\ u = V_g - \frac{k_1}{\chi^2} \sqrt{\frac{k_1}{h\omega_z}} \exp \left(-\sqrt{\frac{\omega_z}{k_1 h}} (z - h) \right) \cos \left[\sqrt{\frac{\omega_z}{k_1 h}} (z - h) + \frac{\pi}{4} - \alpha \right], \\ v = \frac{k_1}{\chi^2} \sqrt{\frac{k_1}{h\omega_z}} \exp \left(-\sqrt{\frac{\omega_z}{k_1 h}} (z - h) \right) \sin \left[\sqrt{\frac{\omega_z}{k_1 h}} (z - h) + \frac{\pi}{4} - \alpha \right], \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (z \leq h), \\ (z \geq h), \end{array} \quad (1)$$

где u и v — продольная и поперечная составляющие скорости, $k_1 = \chi v_*$ — значение коэффициента турбулентности на единичной высоте, $v_* = \chi z \frac{\partial u}{\partial z}$ — динамическая составляющая скорости, χ — универсальная безразмерная постоянная, z_0 — шероховатость подстилающей поверхности, численные значения которой приведены в [10], $V_g = -\frac{1}{\omega_z \rho} \frac{\partial p}{\partial y}$ — геострофический ветер, α — угол между направлением геострофического ветра и ветра в приземном подслое, h — высота приземного подслоя, ω_z — угловая скорость вращения Земли. Профили скорости (1) имеют два участка: приземный подслей (до 100 м) и пограничный слой (1–1,5 км) с различными коэффициентами турбулентности:

$$k = \begin{cases} k_1 z, & z \leq h; \\ k_1 h, & z \geq h. \end{cases}$$

Приведенная зависимость для коэффициента турбулентности была предложена М.И. Юдиным и М.Е. Швецом в [11]. Выбор профиля скорости опирается на материалы работы [12]. Выбор профиля температуры основан на теории Монина–Обухова (см. [1]).



Рис. 2. Линия, ортогональная ВПП, вдоль которой сравниваются результаты

Для расчета параметров атмосферы при обтекании рельефа в работе [13] граничные условия задаются вдалеке от интересующей области, а рельеф специально сглаживается при приближении к границам. В этом случае на границах можно задавать условия как над ровной поверхностью, не учитывая особенности рельефа местности. Влияние рельефа проявляется уже непосредственно при моделировании течения в расчётной области.

При использовании данных, получаемых с помощью мезомасштабной модели атмосферы COSMO-RU07 [14], на первом шаге проводится расчет области, характерный размер которой порядка десяти тысяч километров, на расчетной сетке с шагом 20 км. Граничные условия выбираются с помощью глобальной квазистатической модели атмосферы GME (разработка Метеослужбы Германии) [15] или с помощью глобальной модели IFS Европейского центра среднесрочных прогнозов. На следующем шаге проводится расчет меньшей области величиной порядка тысячи километров на сетке с шагом 7 км. Затем расчеты производятся на еще более мелкой сетке с ячейкой 1 км и на области размерами порядка сотни километров.

Данный подход позволяет использовать граничные условия, специфичные именно для данного региона. Таким образом, удается избежать искусственного сглаживания рельефа.

Постепенное уменьшение размеров ячеек способствует увеличению точности и экономии вычислительных ресурсов.

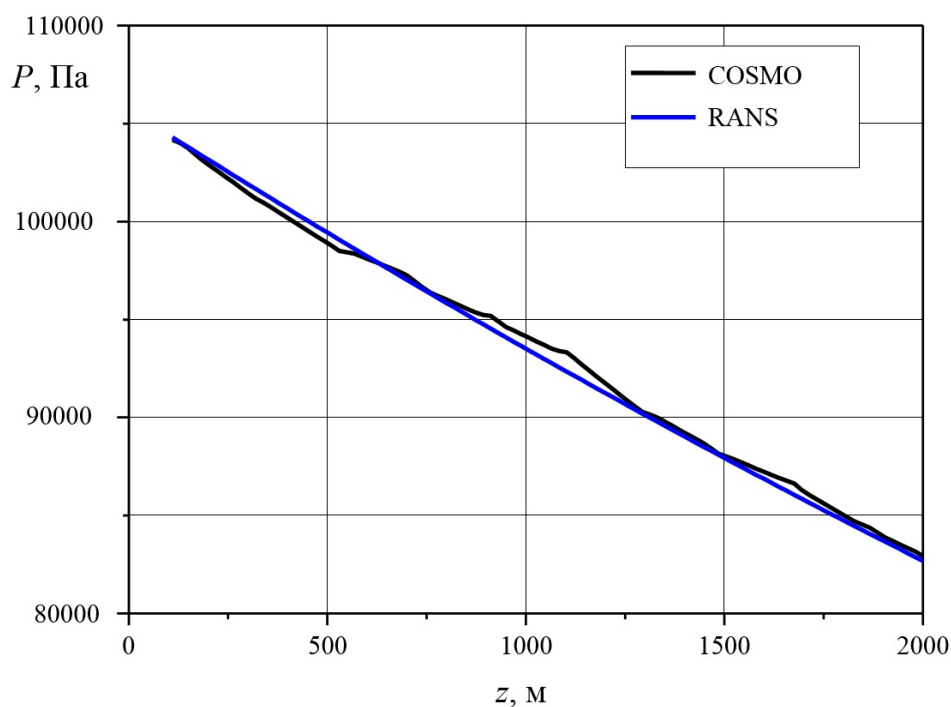


Рис. 3. Профили давления (модель COSMO и RANS-моделирование)

В модели COSMO учитываются такие факторы, влияющие на течение, как солнечное излучение, парообразование, образование капель, дождь, облака, силы тяжести, силы Архимеда и Кориолиса и т.д. Учет данных эффектов является критическим в ряде случаев. Так, в работе [12] показано, что в условиях близости горного аэродрома к морю является необходимым учет конденсации капель.

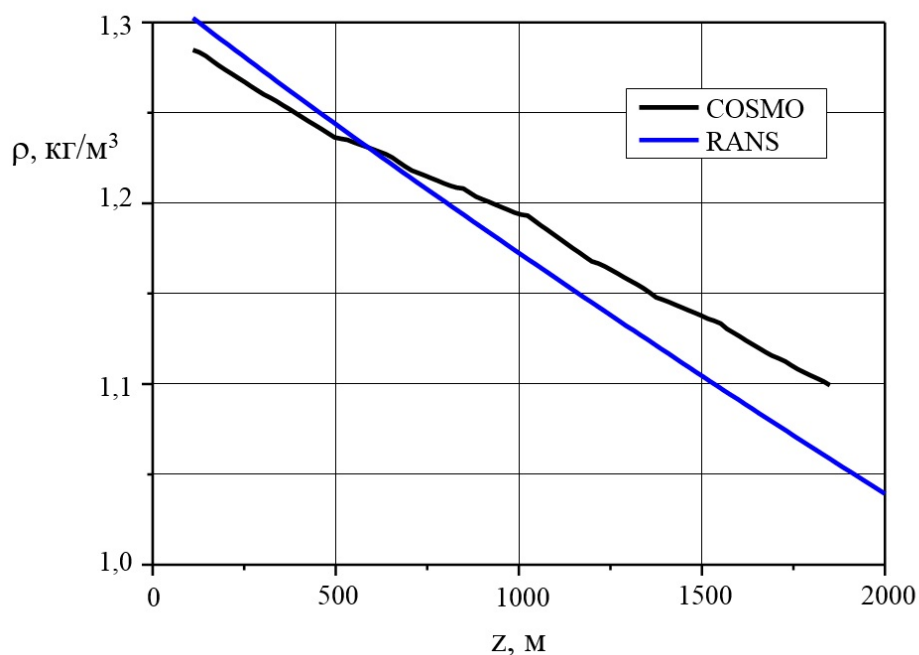


Рис. 4. Профили плотности (модель COSMO и RANS-моделирование)

В предлагаемой методике параметры течения, рассчитанные с помощью модели COSMO-RU07 в большой области, используются в качестве граничных и начальных условий для расчета воздушного течения в подобласти горного аэродрома. Это позволяет получить течение, согласованное с глобальным течением атмосферы.

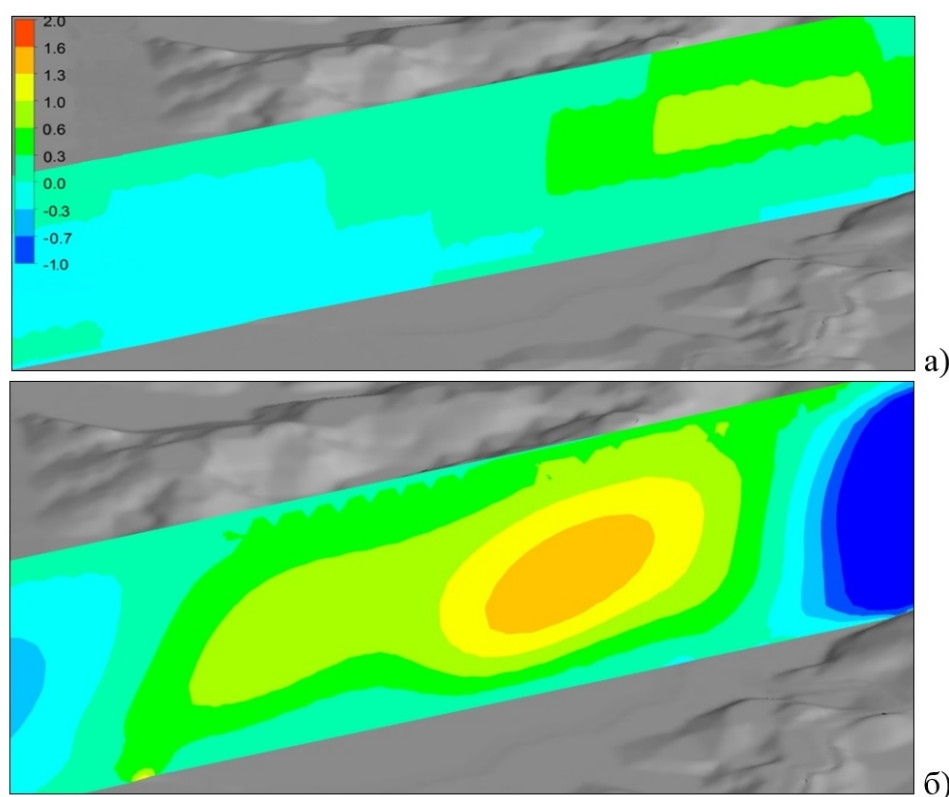


Рис. 5. Поля вертикальной компоненты скорости (м/с) в плоскости симметрии ВПП: а) данные COSMO; б) результаты RANS-моделирования

Для валидации результатов расчёта можно использовать данные о течениях над горным рельефом, полученные с помощью летающей лаборатории, которая представляет собой самолет с необходимыми приборами для измерения параметров атмосферы. Самолет подобного типа может измерить поля скоростей, температуры, влажности, давления, распределение капель по размерам и прочее в большой области за время, за которое параметры атмосферы не успевают существенно измениться. В этом случае собранные данные могут служить для верификации решения начально-краевой задачи для системы уравнений Рейнольдса и валидации предлагаемой технологии. Летающая лаборатория имеет преимущество перед традиционными и широко распространёнными шарами-зондами, позволяющими измерять параметры атмосферы только в районе привязки зондов.

3. Результаты расчета

В качестве примера приведен результат численного моделирования в рамках краевой задачи для уравнений Рейнольдса течения сжимаемого (совершенного) газа над горным ландшафтом в районе аэропорта Адлер. Пограничный слой считался полностью турбулентным. Для замыкания системы уравнений использована двухпараметрическая SST-модель турбулентности. Набегающий поток был задан граничным условием типа Inlet [16]. Профили скорости (три компоненты) и статической температуры, а также распределение температуры на подстилающей поверхности заданы по данным Росгидромета. На подстилающей поверхности выполняется условие прилипания.

Проведенные расчеты позволили произвести сравнение ряда моделируемых параметров с исходными (начальными) данными, предоставленными Росгидрометом и полученными с

помощью COSMO. Результаты численного моделирования приведены на рис. 2–5. Они хорошо передают ветровую обстановку в окрестности взлетно-посадочной полосы (ВПП). Расхождения можно объяснить различиями решаемых уравнений, численных схем и расчётных сеток.

4. Выводы

Разработана технология моделирования атмосферных течений над горным ландшафтом в районе выполнения полётов. Приведены результаты расчета в районе аэропорта Адлер. Полученные результаты нашли применение в пилотажных стендах и авиационных тренажёрах при модификации моделей динамики с учётом атмосферного фактора.

Авторы выражают благодарность А.А. Рыжову, А.А. Корнякову, И.С. Боснякову за помощь при выполнении настоящей работы.

Данная работа выполнена в рамках Проекта «Разработка программно-аппаратного комплекса реалистичного восприятия летчиком сложных режимов полета и оценки его психофизиологического состояния» (Договор № 02.С25.31.0017 между ОАО РСК «МиГ» и Министерством образования и науки РФ об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием ФГАОУ ВПО МФТИ (ГУ)).

Литература

1. *Вышинский В.В., Судаков Г.Г.* Вихревой след самолета в турбулентной атмосфере (физические и математические модели). М.: ЦАГИ, 2005.
2. *Вышинский В.В., Замятин А.Н., Судаков Г.Г.* Теоретическое и экспериментальное исследование эволюции вихревого следа за самолетом, летящим в пограничном слое атмосферы // *Техника воздушного флота*. 2006. № 3–4. С. 25–38.
3. *Вышинский В.В., Судаков Г.Г.* Вихревой след самолета и вопросы безопасности полетов // *Труды МФТИ*. 2009. Т.1, № 3. С. 73–93, ISSN 2072-6759.
4. *Вышинский В.В., Зудов К.А., Кудров М.А., Стасенко А.Л.* Физико-математическая модель атмосферных процессов, происходящих в окрестности горного аэродрома // *Математическое моделирование*. 2015. Т. 27, № 3. С. 20–32.
5. *Барри Г.Р.* Погода и климат в горах. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
6. *Зилитинкевич С.С.* Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1970.
7. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статическая гидромеханика. Т. 1. М.: Наука, 1965.
8. *Лайхтман Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 340 с.
9. *Матвеев Л.Т.* Динамика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
10. *Гандин Л.С., Лайхтман Д.Л., Матвеев Л.Т., Юдин М.И.* Основы динамической метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1955.
11. Гидродинамические и статистические исследования процессов в атмосфере: сб. статей / Ред. М.И. Юдин, М.Е. Швец. Л.: Гидрометеиздат, 1976.
12. *Zudov K.A., Vyshinsky V.V., Kudrov M.A.* On the flight operating safety in the mountainous zone airport // ICAS, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. St. Petersburg, Russia, September 7–12, 2014. P. 4280–4291.
13. *Koblitz Tilman; Bechmann Andreas; Sogachev Andrey; Surensen Niels N.* Atmospheric stability in CFD & NDASH; Representation of the diurnal cycle in the atmospheric boundary layer // *Proceedings. European Wind Energy Association (EWEA)*. 2012.

14. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V. Мезомасштабная модель COSMO-RU07 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник. 2012. № 39. С. 15–48.
15. Majewski D.D., Liermann D., Prohl P., Ritter B., Buchhold M., Hanisch T., Paul G., Wergen W. The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution test // Mon. Wea. Rev. 2002. V. 130, N 2. P. 319–338.
16. Toro E. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2009. 721 p.

References

1. Vyshinsky V.V., Soudakov G.G. Aircraft Trailing Vortex in the Turbulent Atmosphere (Physical and Mathematical Models). M.: TsAGI. 2005.
2. Vyshinskiy V.V., Zamyatin A.N., Soudakov G.G. Theoretical and Experimental Research on the Trailing Vortex Evolution of the Aircraft in the Atmosphere Boundary Layer. Airfleet Engineering. 2006. N 3–4. P. 25–38.
3. Vyshinskiy V.V., Soudakov G.G. Aircraft Trailing Vortex and the Problems of the Flight Safety. MIPT Proceedings. 2009. V. 1, N 3. P. 73–93, ISSN 2072-6759.
4. Vyshinskiy V.V., Zudov K.A., Kudrov M.A., Stasenko A.L. Physics-mathematical model of the atmospheric processes in the vicinity of the mountainous airfield. Mathematical modeling. 2015. V. 27, N 3. P. 20–32.
5. Barri G.R. Weather and climate in the mountains. L.: Gidrometeoizdat, 1984.
6. Zilitinkevich S.S. The dynamics of the atmospheric boundary layer. L.: Hydrometeorological Publishing, 1970.
7. Monin A.S., Yaglom A.M. Static fluid mechanics. V. 1. M.: Nauka, 1965.
8. Laikhtman D.L. The physics of the atmospheric boundary layer. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 340 p.
9. Matveev L.T. The dynamics of clouds. L.: Gidrometeoizdat, 1981.
10. Gandin L.S., Laikhtman D.L., Matveev L.T., Yudin M.I. The fundamentals of dynamic meteorology. L.: Gidrometeoizdat, 1955.
11. Hydrodynamic and Statistical Researches of the Atmospheric Processes: Collection of Articles. Editors M.I. Yudin, M.E. Shvets. SPb.: Hydrometeoizdat, 1976.
12. Zudov K.A., Vyshinsky V.V., Kudrov M.A. On the flight operating safety in the mountainous zone airport. ICAS, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. St. Petersburg, Russia, September 7–12, 2014. P. 4280–4291.
13. Koblitz Tilman; Bechmann Andreas; Sogachev Andrey; Surensen Niels N. Atmospheric stability in CFD & NDASH; Representation of the diurnal cycle in the atmospheric boundary layer. Proceedings. European Wind Energy Association (EWEA). 2012.
14. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V. The mesoscale model COSMO-RU 07 and the results of its operational tests. Information Collection. 2012. N 39. P. 15–48.
15. Majewski D.D., Liermann D., Prohl P., Ritter B., Buchhold M., Hanisch T., Paul G., Wergen W. The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution test. Mon. Wea. Rev. 2002. V. 130, N 2. P. 319–338.
16. Toro E. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2009. 721 p.