



ЦИАМ

**О РОЛИ ЧИСЛЕННЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ
ИНСТРУМЕНТОВ В ОПИСАНИИ
ЗВУКОВОГО УДАРА**

**А.Н. Крайко, К.С. Пьянков, Х.Ф. Валиев,
Н.И. Тилляева**

ЦИАМ им. П.И. Баранова

**Всероссийский аэроакустический форум
VIII Всероссийская конференция
«Вычислительный эксперимент в аэроакустике
и аэродинамике»**

Геленджик, 20-25 сентября 2021



1. **Ландау Л.Д.** Об ударных волнах на далеких расстояниях от места их возникновения // ПММ. **1945. 9** (4). 286-292.
2. **Whitham G.B.** The Propagation of Spherical Blast // Proceedings of the Royal Society. A. **1952. 203** (1075). 571-581.
3. **Whitham G.B.** The Flow Pattern of a Supersonic Projectile // Comm. Pure Appl. Mathem. **1952. 5** (3). 301-348.
4. **Христианович С.А.** Ударная волна на значительном расстоянии от места взрыва // ПММ. **1956. 20** (5). 599-605.
5. **Губкин К.Е.** Распространение разрывов в звуковых волнах // ПММ. **1958. 22** (4). 561-564.
6. **Walkden F.** The Shock Pattern of a Wing-Body Combination Far From the Flight Path // Aeronautical Quarterly. **1958. 9**. 164-194.
7. **Гриб А.А., Рыжов О.С., Христианович С.А.** Теория коротких волн // ПМТФ. **1960. 1**. 63-74.
8. **Рыжов О.С.** Затухание ударных волн в неоднородных средах // Прикл. механ. и техн. физ. **1961. 2**. 15-25.
9. **Полянский О.Ю.** О затухании ударных волн в движущейся среде с переменными плотностью и температурой // ПММ. **1960. 24** (5). 912-915.
10. **Рыжов О.С.** Затухание ударных волн в стационарных течениях // ПМТФ. **1961. 6**. 36-43.



11. **Carlson H.W.** Influence of Airplane Configuration on Sonic Boom Characteristics // J. of Aircraft. **1964. 1** (2). 82-86.
12. **Thomas C. L. Extrapolation of Wind-Tunnel Sonic Boom Signatures Without Use of a Whitham F-Function. NASA SP-255. 1970. 205-217.**
13. **Жилин Ю.Л.** О звуковом ударе // Учен. зап. ЦАГИ. **1971. 2** (3). 1-11.
14. **Жилин Ю.Л.** Теория звукового удара // Сборник работ по звуковому удару. Труды ЦАГИ. **1973.** Вып. 1489. 108 с. 3-24.
15. **Darden C.M.** Minimization of Sonic-Boom Parameters in Real and Isothermal Atmospheres. NASA TN D-7842. **1975.** 28 p.
16. **Уизем Дж.** Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, **1977.** 622 с.
17. **Darden C.M.** Minimization of Sonic-Boom Parameters in Real and Isothermal Atmospheres. NASA TN D-7842. **1975.** 28 p.
18. **Darden C.M.** Sonic-Boom Minimization with Nose-Bluntness Relaxation. NASA TP 1348. **1979.** 50 p.
19. **Mack R.J., Darden C.M.** Some Effects of Applying Sonic Boom Minimization to Supersonic Cruise Aircraft Design // J. Aircraft. **1980. 17** (3) 182-186.
20. **Darden C.M.** Limitation of Linear Theory for Sonic Boom Calculations // J. of Aircraft. **1993. 30** (3). 309-314.
21. **Жилин Ю.Л., Коваленко В.В.** О связывании ближнего и дальнего полей в задаче о звуковом ударе // Учен. зап. ЦАГИ. **1998. 29** (3-4). 111-122.



22. **Makino Y., Aoyama T., Iwamiya T. et al.** Numerical Optimization of Fuselage Geometry to Modify Sonic-Boom Signature // *J. of Aircraft*. **1999**. **36** (4). 668–674.
23. **Plotkin K.J.** State of the Art of Sonic Boom Modeling // *J. of the Acoustical Society of America*. **2002**. **111** (1). Pt. 2. 530-536.
24. **Makino Y., Suzuki K., Noguchi M. et al.** Nonaxisymmetrical Fuselage Shape Modification for Drag Reduction of Low-Sonic-Boom Airplane // *AIAA Journal*. **2003**. **41** (8). 1413–1420.
25. **Жилин Ю.Л., Ивантеева Л.Г., Чернышев С.Л.** Эквивалентные тела вращения, обладающие минимальным уровнем звукового удара // *Труды ЦАГИ*. **2005**. Вып. 2670. 12-19.
26. **Жилин Ю.Л., Ивантеева Л.Г., Чернышев С.Л.** О телах вращения минимального звукового удара // *Учен. зап. ЦАГИ*. **2006**. **37** (3). 36-45.
27. **Коваленко В.В., Чернышев С.Л.** К вопросу о снижении звукового удара // *Учен. зап. ЦАГИ*. **2006**. **37** (3). 53-62.
28. **Farhat C., Maute K., Argrow B. et al.** Shape Optimization Methodology for Reducing the Sonic Boom Initial Pressure Rise // *AIAA Journal*. **2007**. **45** (5). 1007–1018.
29. **Choi S., Alonso J., Kroo I. et al.** Multifidelity Design Optimization of Low-Boom Supersonic Jets // *J. of Aircraft*. **2008**. **45** (1). 106–118.



30. **Bui Trong T. CFD Analysis of Nozzle Jet Plume Effects on Sonic Boom Signature, NASA Dryden Flight Research Center, California. 2009. 28 p.**
31. **Чернышев С.Л. Звуковой удар. М.: Наука, 2011. 351 с.**
32. **Rallabhandi S. Advanced Sonic Boom Prediction Using Augmented Burgers Equation // J. of Aircraft. 2011. 48 (4) 1245–1253.**
33. **Chiba K., Makino Y., Takatoya T. Design-Informatics Approach for Intimate Configuration of Silent Supersonic Technology Demonstrator // J. of Aircraft. 2012. 49 (5). 1200–1211.**
34. **Ordaz I., Li W. Integration of Off-Track Sonic Boom Analysis in Conceptual Design of Supersonic Aircraft // J. of Aircraft. 2014. 51 (1). 23–28.**
35. **Li W., Rallabhandi S. Inverse Design of Low-Boom Supersonic Concepts Using Reversed Equivalent-Area Targets // J. of Aircraft. 2014. 51 (1). 29–36.**
36. **Minelli A., Salah el Din I., Carrier G. Inverse Design Approach for Low-Boom Supersonic Configurations // AIAA Journal. 2014. 52 (10). 2198–2212.**
37. **Ordaz I., Geiselhart K., Fenbert J. Conceptual Design of Low-Boom Aircraft with Flight Trim Requirement // J. of Aircraft. 2015. 52 (3). 932–939.**
38. **Housman J., Kenway G., Jensen J. et al. Efficient Near-Field to Mid-Field Sonic Boom Propagation using a High-Order Space Marching Method // AIAA Aviation 2019, Session: APA-25, Commercial Supersonic Technologies III, Dallas, Texas, June 20, 2019. 24 p.**

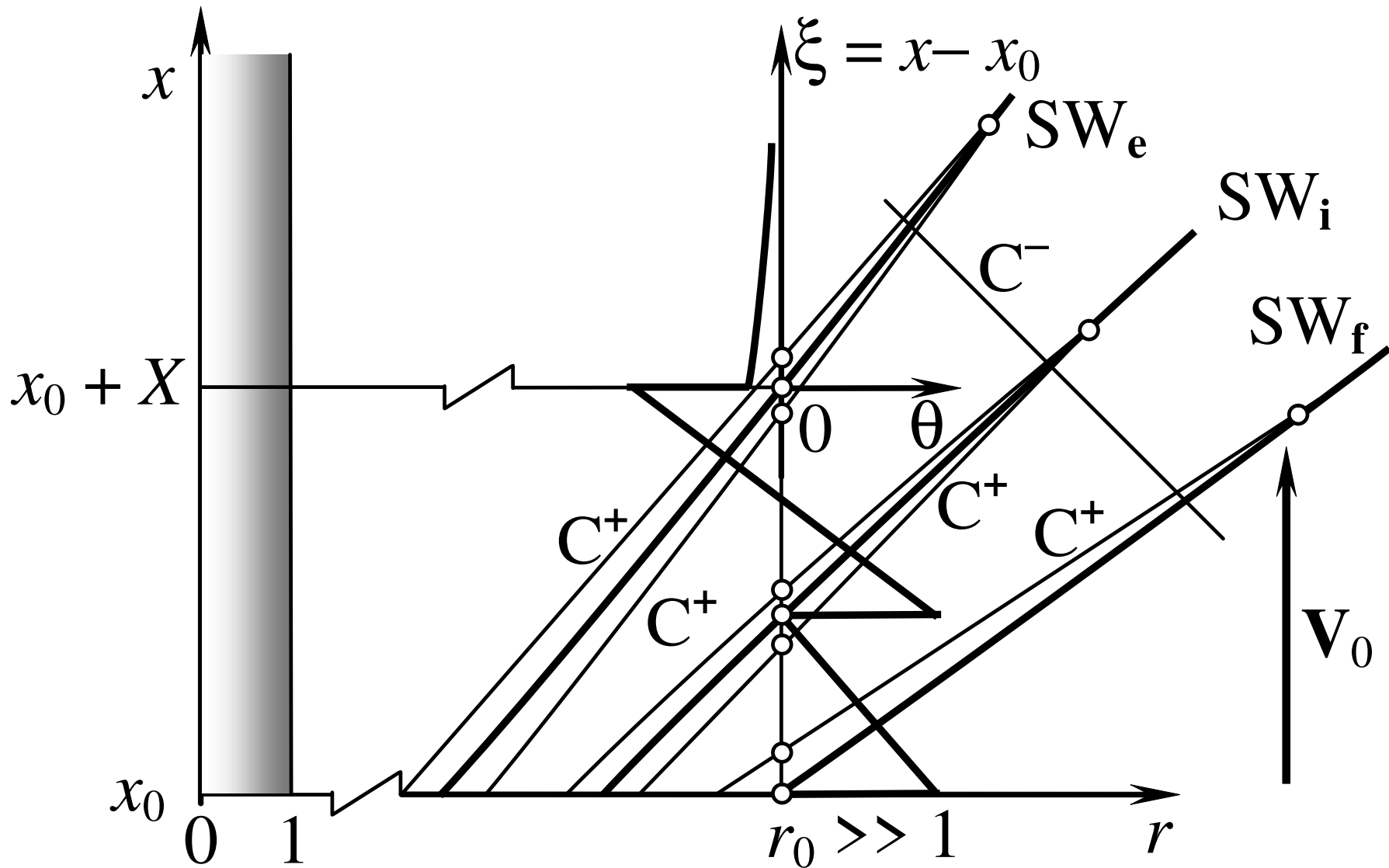
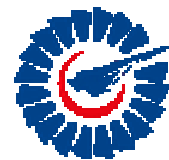
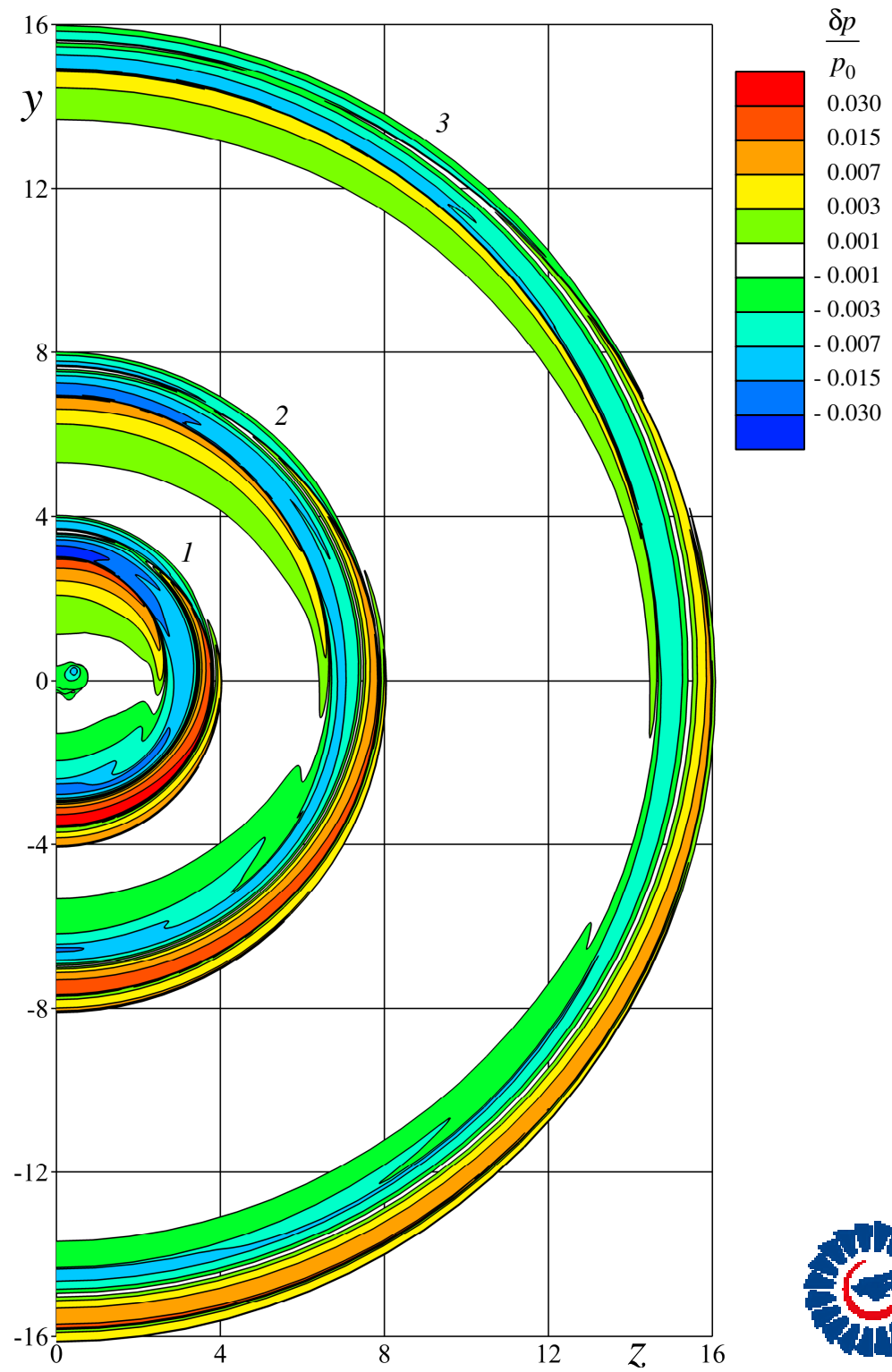
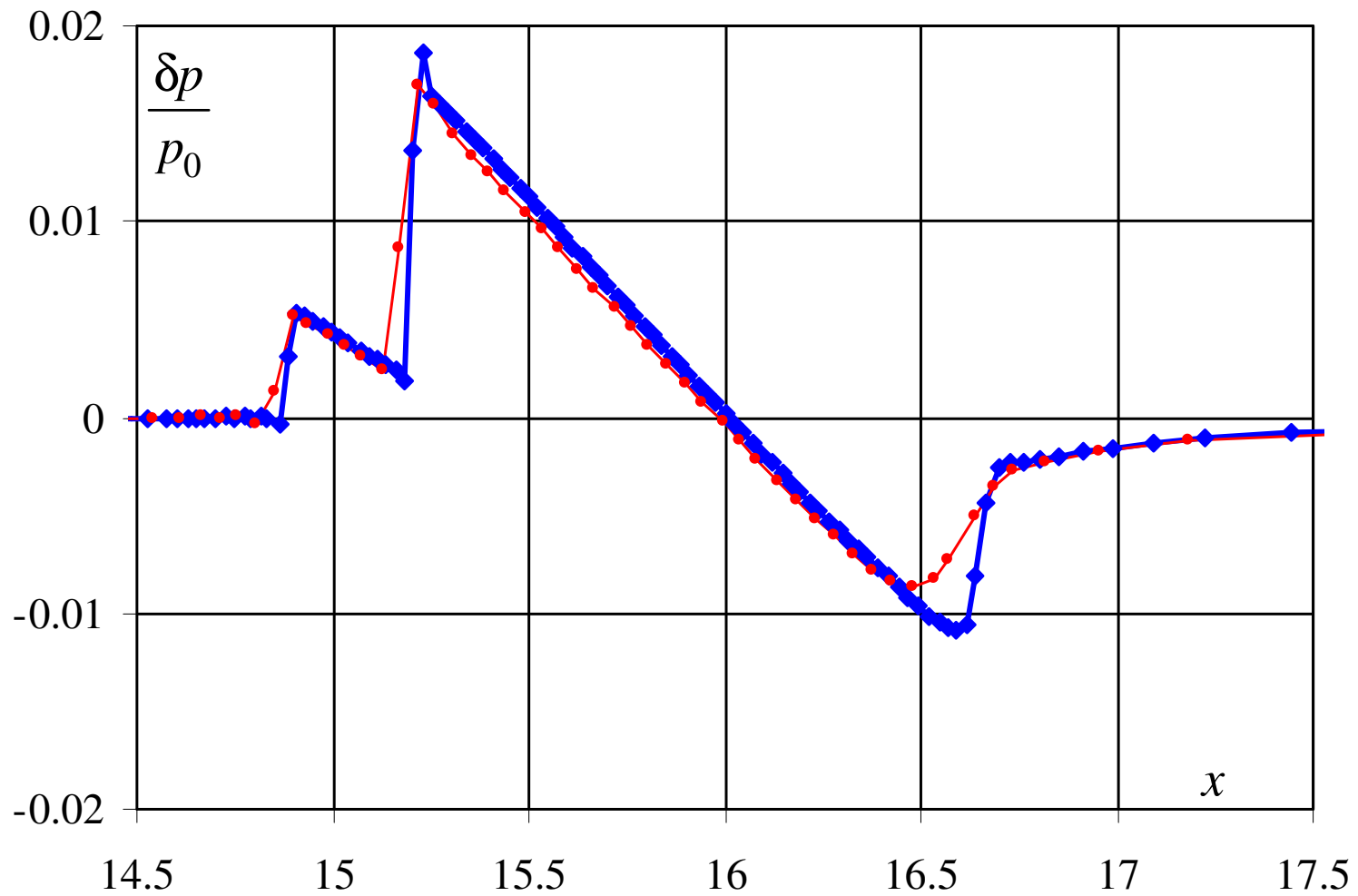


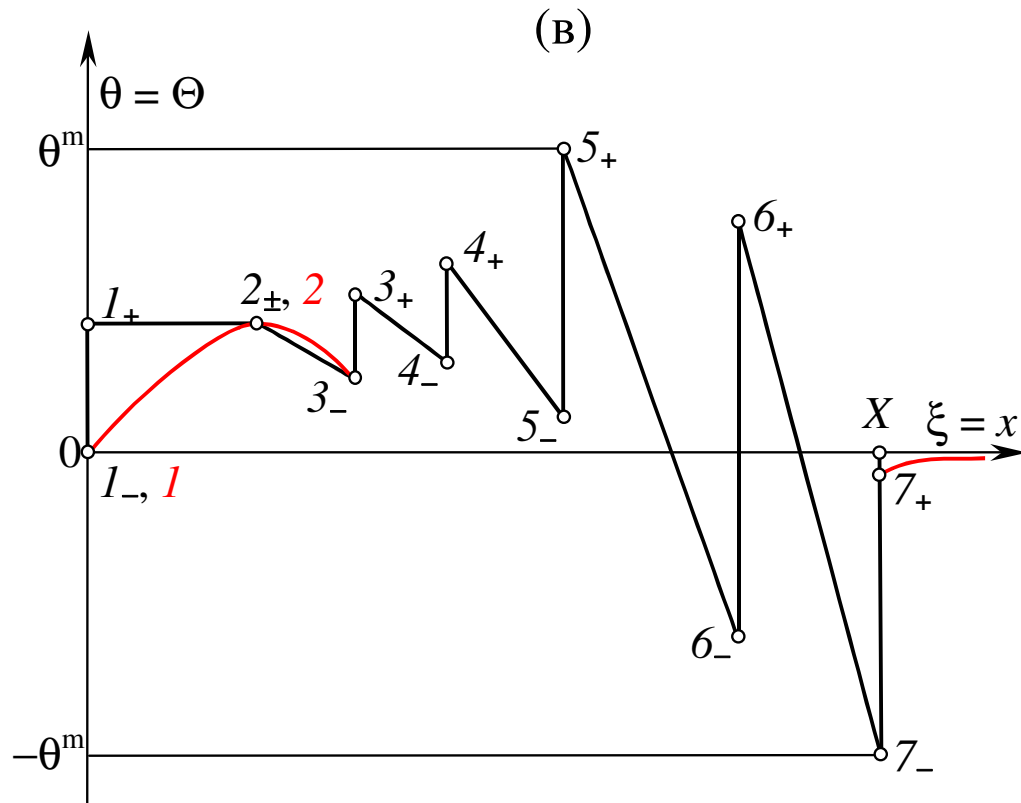
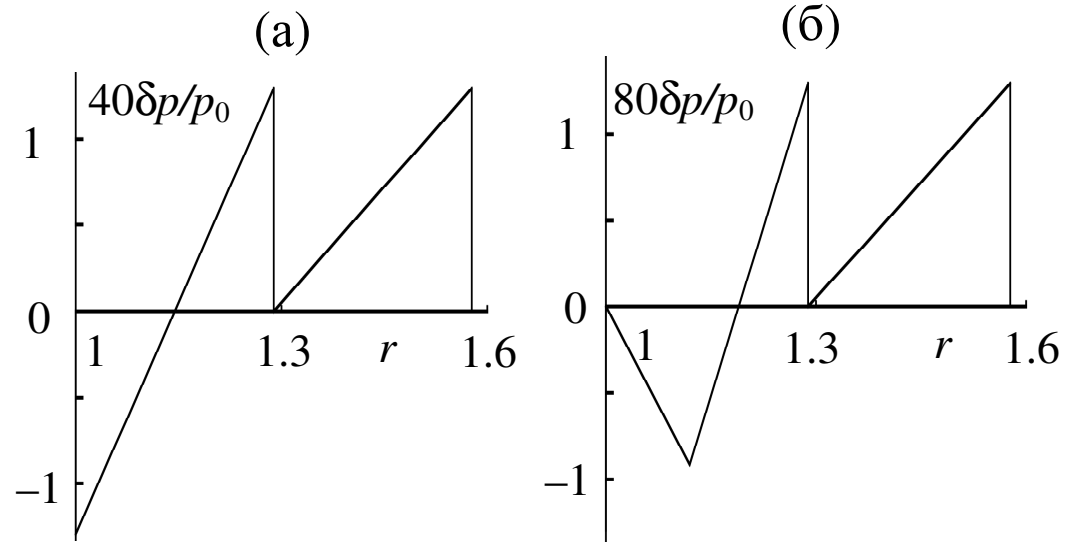
Схема фрагмента "короткой" волны звукового удара с тремя УВ и приходящими на них C^+ -характеристиками



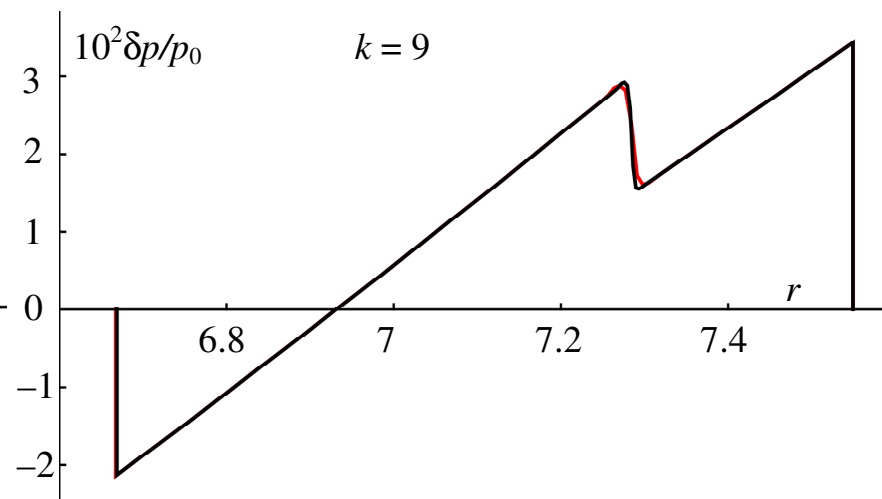
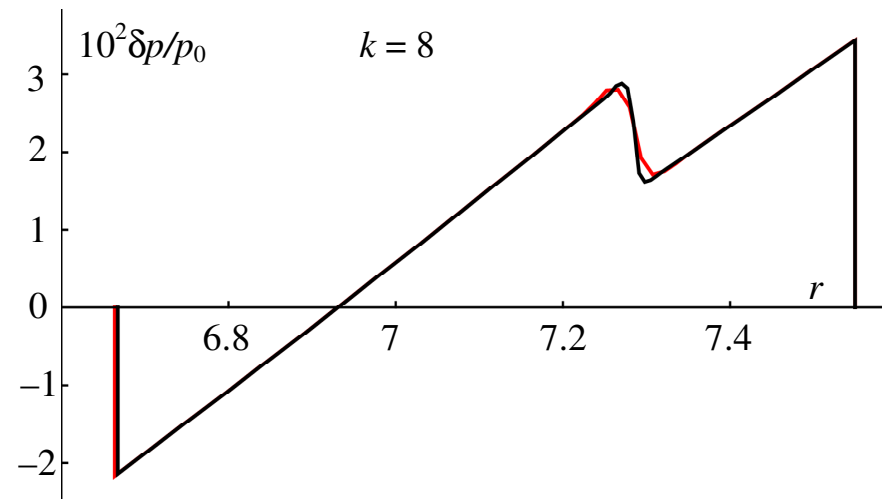
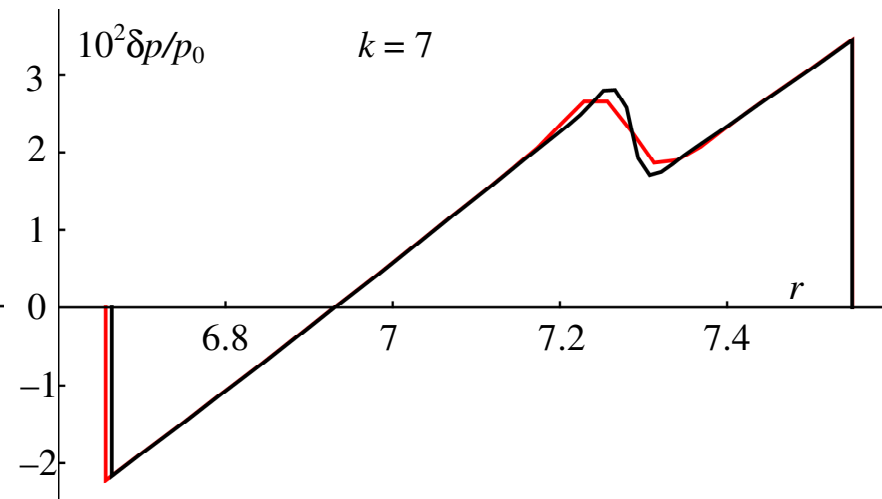
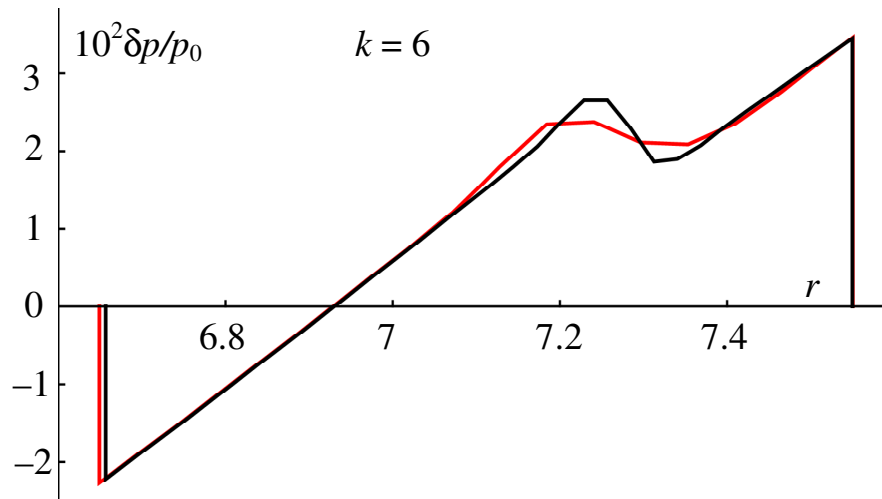
UWA



Сравнение результатов расчета неявной пространственной программой на сетке с $K \approx 1 \cdot 10^6$ (кривая с ромбиками) и на сетке с $K \approx 1.25 \cdot 10^5$ (кривая с кружочками)

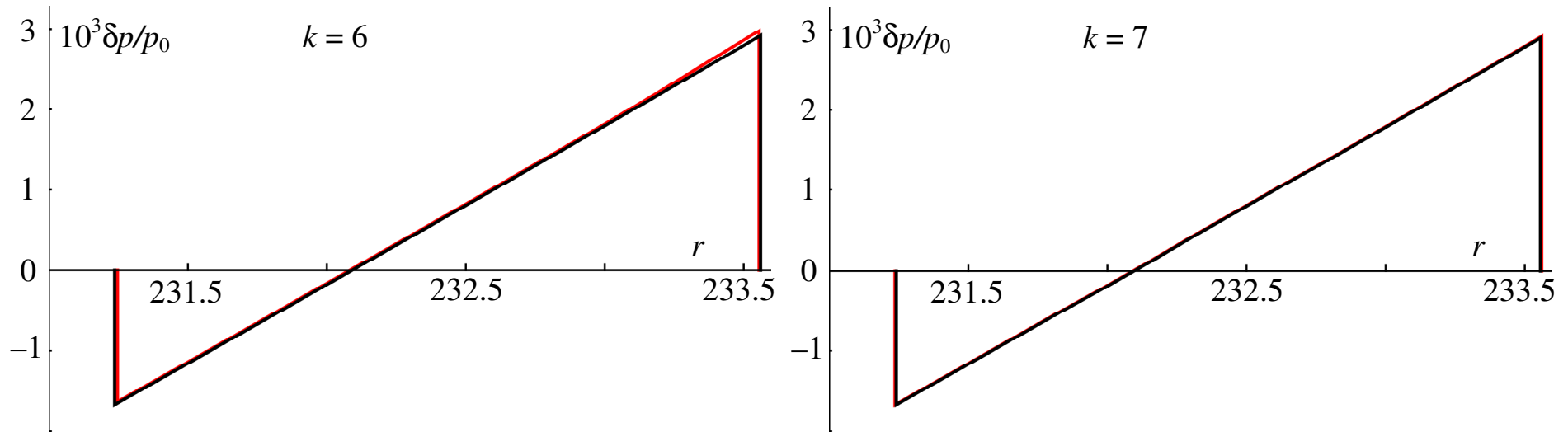


Начальные распределения $\delta p/p_0$ и θ

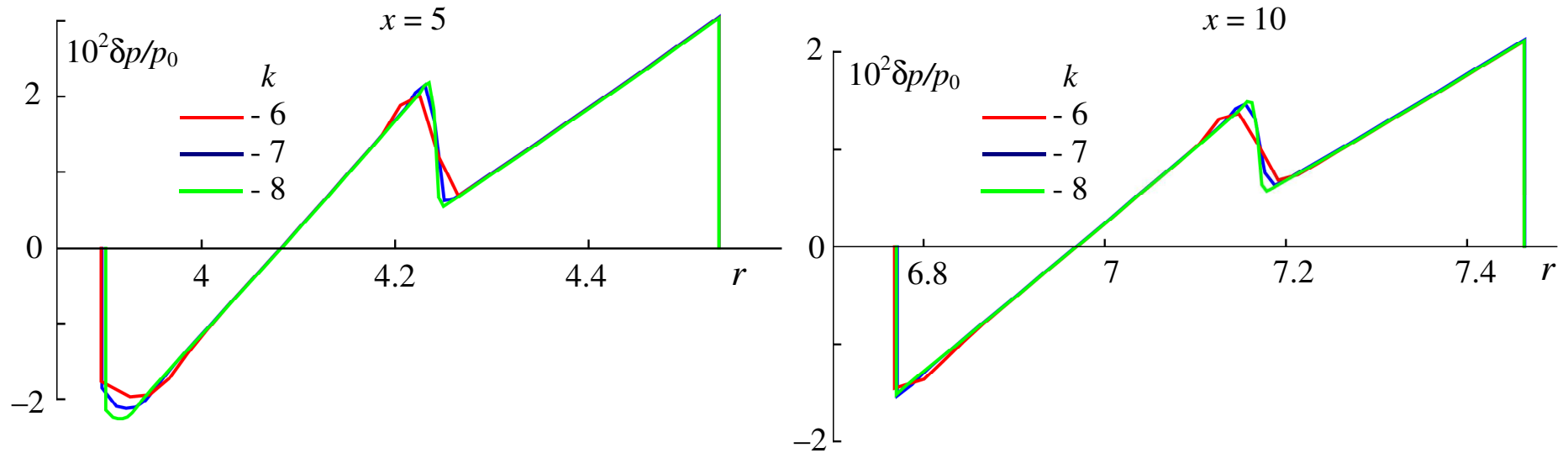


Кривые $\delta p/p_0 = f(r)$ при $x = 10$, рассчитанные маршем на сетках с 2^k (черные кривые) и с 2^{k-1} (красные кривые) ячейками в слоях $x = \text{const}$

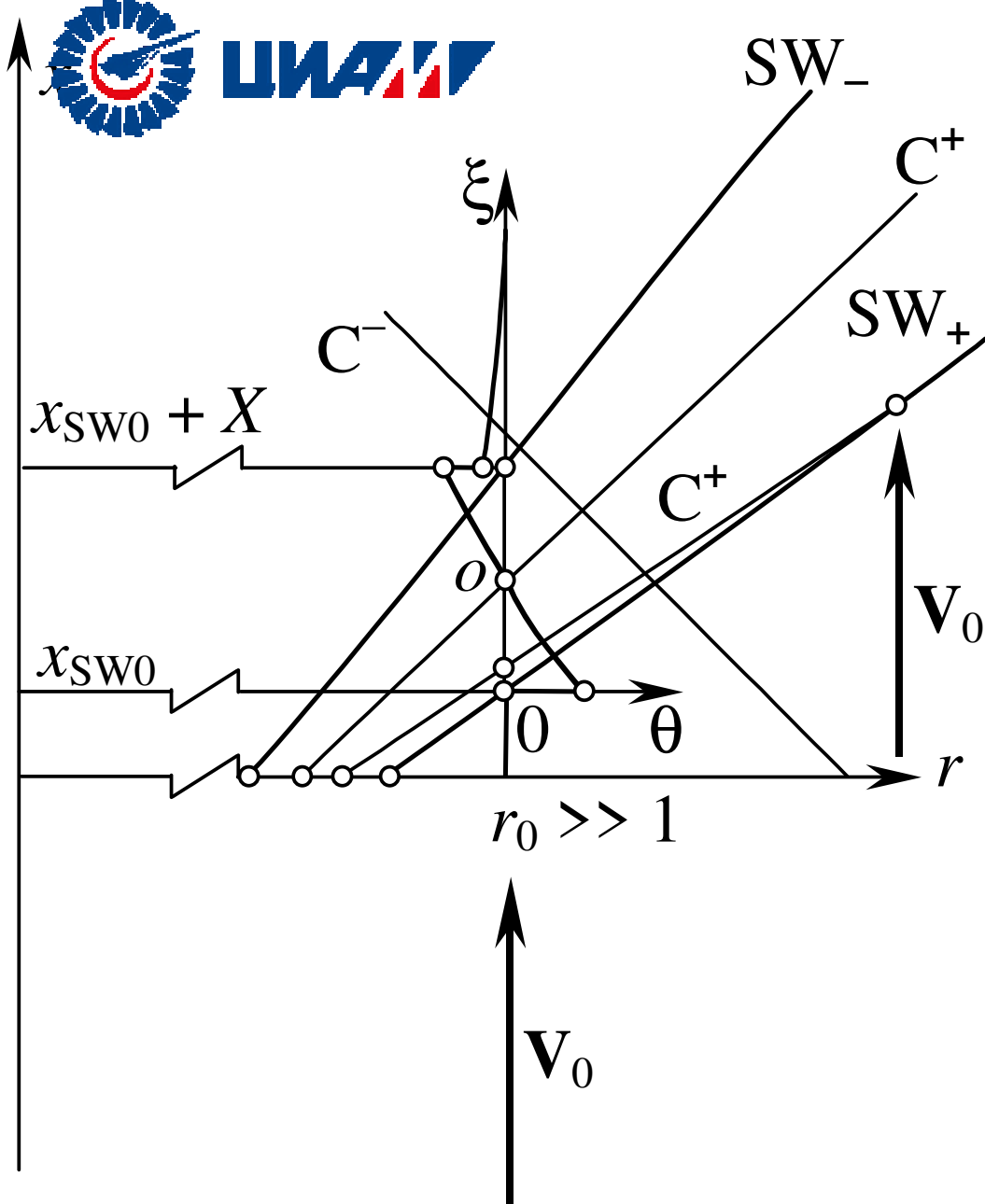




N-волны при счете маршем сверхзвукового осесимметричного течения
до $x = 400$ с 2^k (черные кривые) и 2^{k-1} (красные кривые) ячейками
в слоях $x = \text{const}$



Кривые $\delta p / p_0 = f(r)$ для $x = 5$ и 10 , рассчитанные на трех сетках при начальных параметрах без замыкающей УВ



$$\frac{1}{\rho a^2} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{v}{r}$$

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = g \cos \phi$$

$$\frac{d}{dt} = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial r}$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_0}{\partial r} = g \cos \phi$$

$$h + \frac{V^2}{2} - rg \cos \phi =$$

$$= H(\psi), \quad s_0 = S(\psi)$$



$$p - p_0 = \delta p, \quad \delta \rho = M_0^2 \delta p, \quad \delta \mu = \frac{\gamma - 1 + 2 \sin^2 \mu_0}{\rho_0 \sin 2\mu_0} \delta p$$

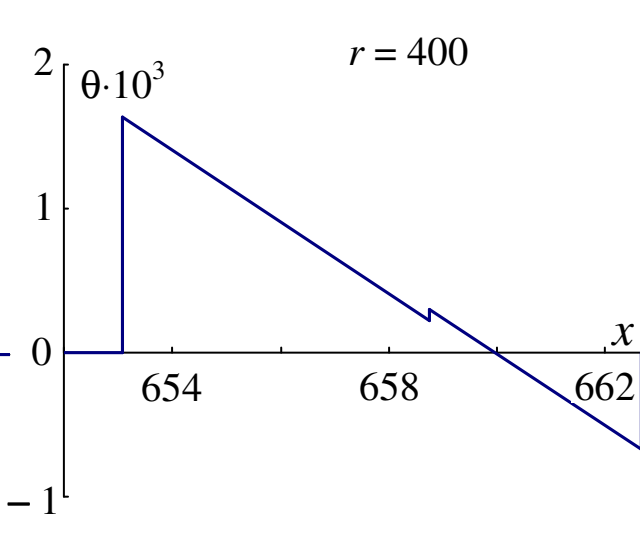
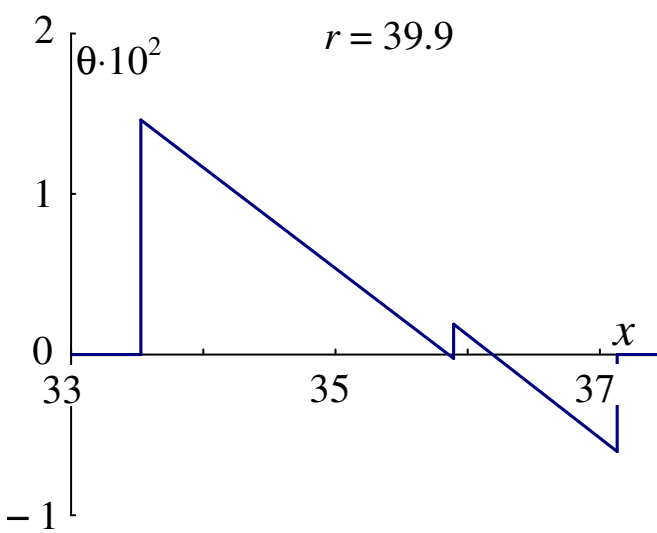
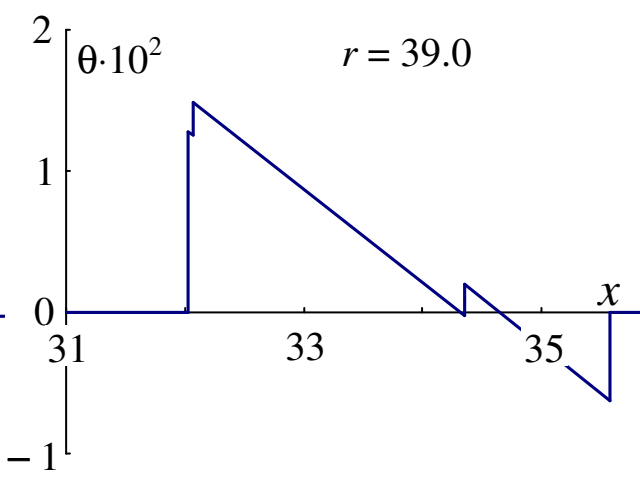
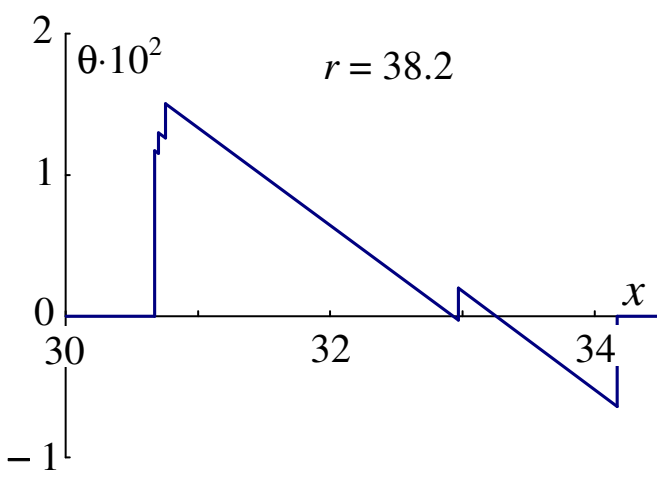
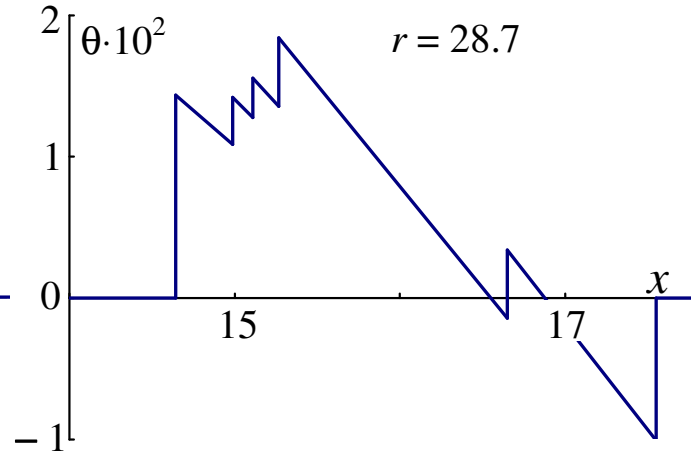
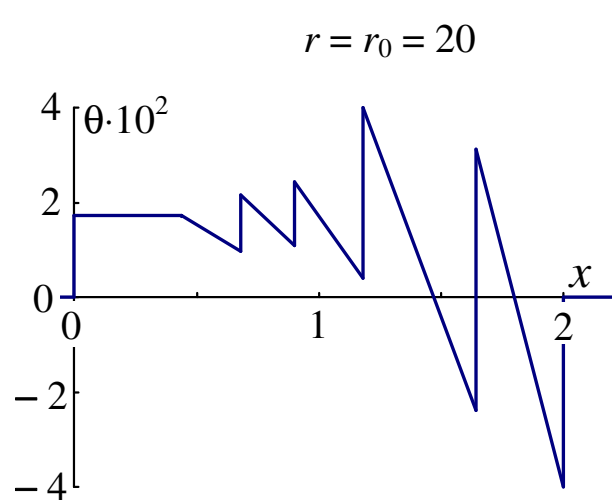
$$C^\pm : \frac{dx}{dr} = \pm \text{ctg} \mu_0 \mp \frac{\theta \pm \delta \mu}{\sin^2 \mu_0}$$

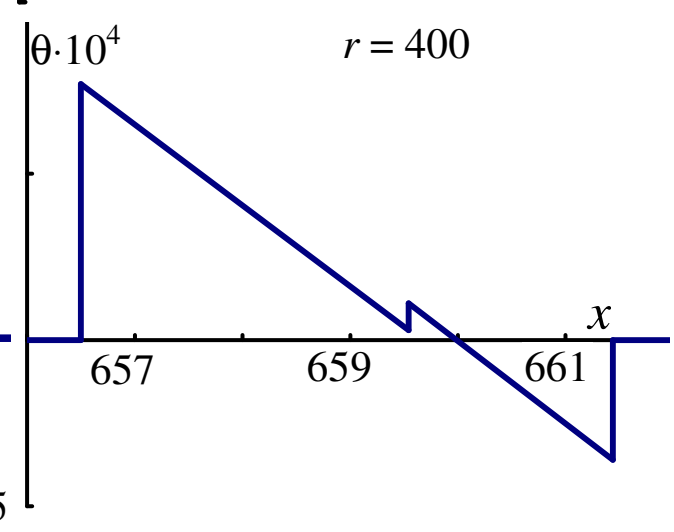
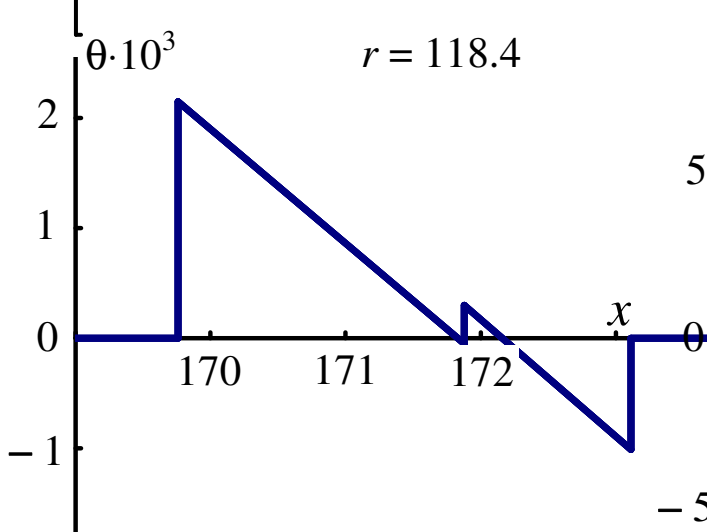
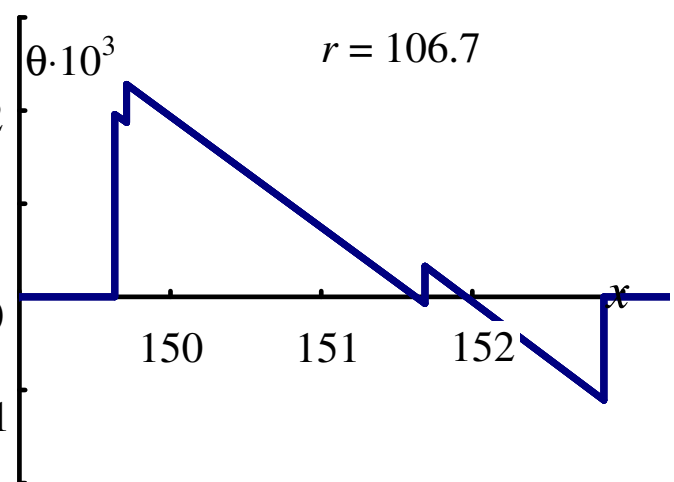
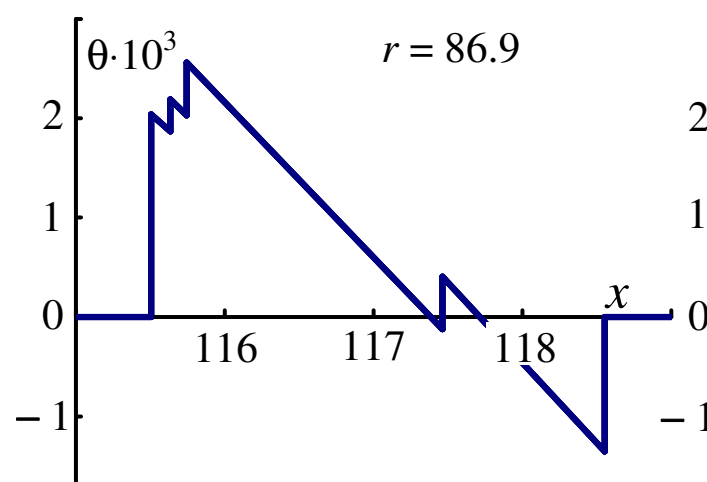
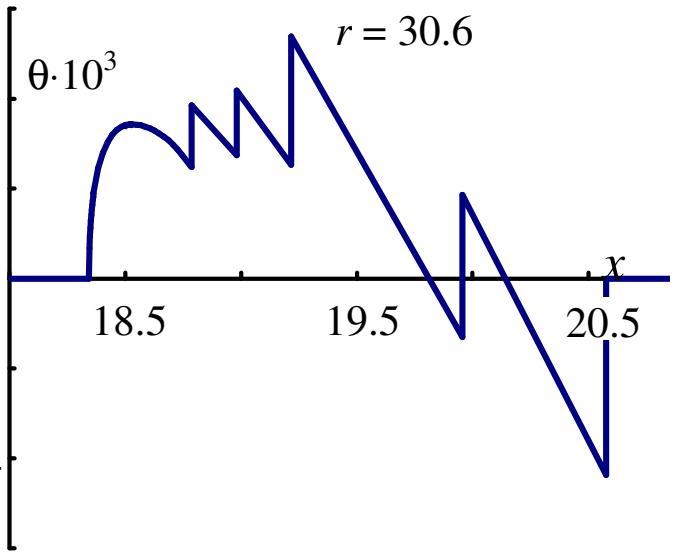
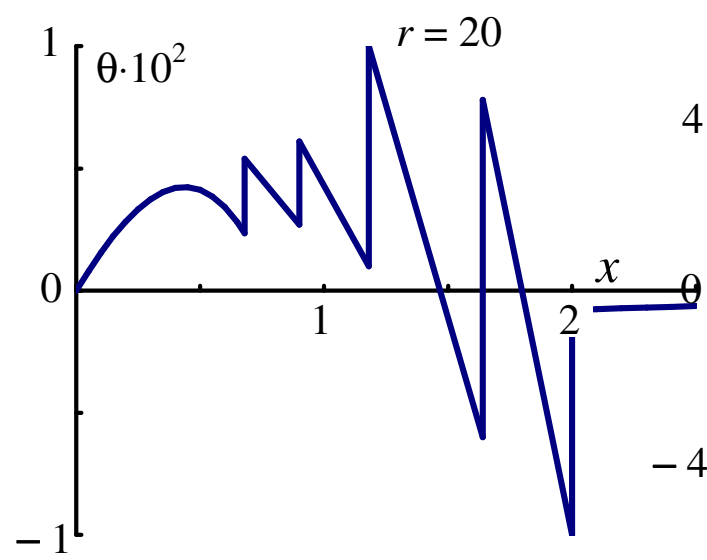
$$\frac{d\theta}{dr} \pm \frac{\text{ctg} \mu_0}{\rho_0} \frac{d\delta p}{dr} + \frac{\theta}{r} + \left(\theta \mp \frac{\text{ctg} \mu_0}{\rho_0} \delta p \right) \frac{g \cos \phi}{\sin^2 \mu_0} = 0$$

$$\theta = \Theta(\xi) \Omega(r, r_0), \quad \delta p = \theta \rho_0 \text{tg} \mu_0, \quad \Omega(r, r_0) = \sqrt{\frac{r_0 \rho_0^0 \text{ctg} \mu_0}{r \rho_0 \text{ctg} \mu_0^0}}$$

$$\frac{dx_{\text{sw}}}{dr} = \text{ctg} \mu_0 - [\Theta(\xi_-) + \Theta(\xi_+)] \Phi, \quad \Phi = \frac{\gamma + 1}{\sin^2 2\mu_0} \Omega(r, r_0)$$

$$\frac{d\chi}{dr} = 2\Phi, \quad \frac{d\xi_-}{dr} = \frac{\Theta(\xi_-) - \Theta(\xi_+)}{1 - \chi \Theta'(\xi_-)} \Phi, \quad \frac{d\xi_+}{dr} = \frac{\Theta(\xi_+) - \Theta(\xi_-)}{1 - \chi \Theta'(\xi_+)} \Phi$$





Вязкое «размазывание» слабых ударных волн

$$\delta p = \frac{\delta p_+ + \delta p_-}{2} + \frac{\delta p_+ - \delta p_-}{2} \operatorname{th} \frac{n}{\Delta}$$

$$\Delta = \frac{\Delta^\circ}{L^\circ} = \frac{4\gamma[4\operatorname{Pr} + 3(\gamma - 1)]M_0}{3(\gamma + 1)(\delta p_+ - \delta p_-)\operatorname{Pr}\operatorname{Re}} =$$

$$= \frac{1.7}{l(\delta p_+ - \delta p_-)10^6} \underset{l=30, (\delta p_+ - \delta p_-)=1\text{Па}}{\approx} 0.6 \cdot 10^{-2}$$

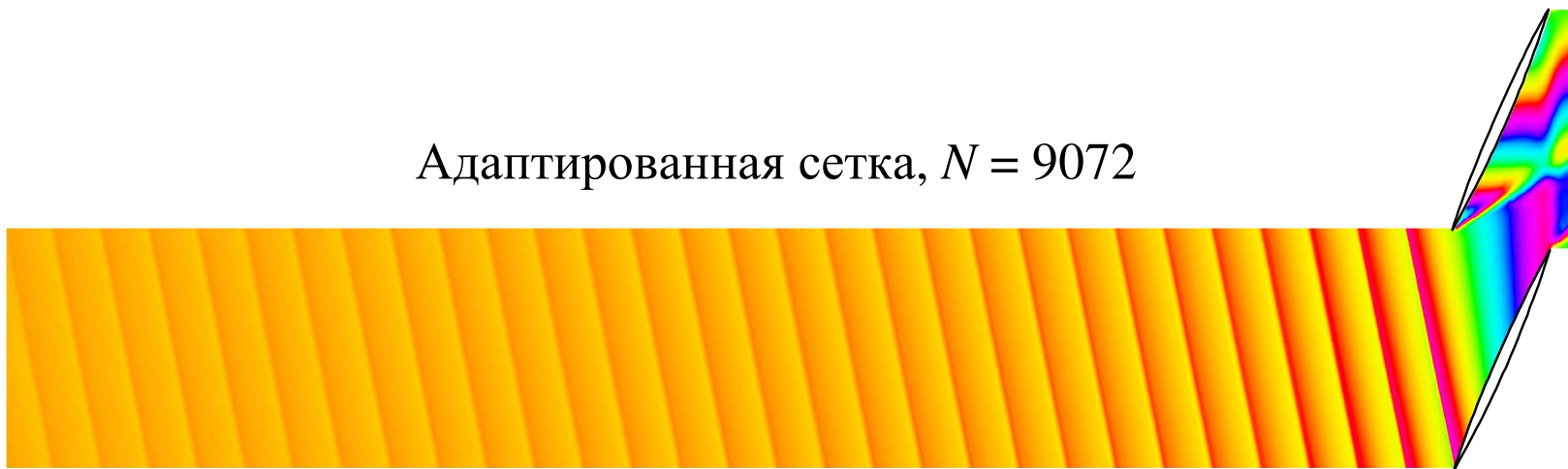
$$\operatorname{Re} = \frac{L^\circ V_0^\circ}{\nu^\circ}, \quad \operatorname{Pr} = \frac{\nu^\circ}{\kappa^\circ} \rho_0^\circ c_{p^\circ}, \quad \nu^\circ = \frac{\eta^\circ + 0.75\zeta^\circ}{\rho_0^\circ}$$



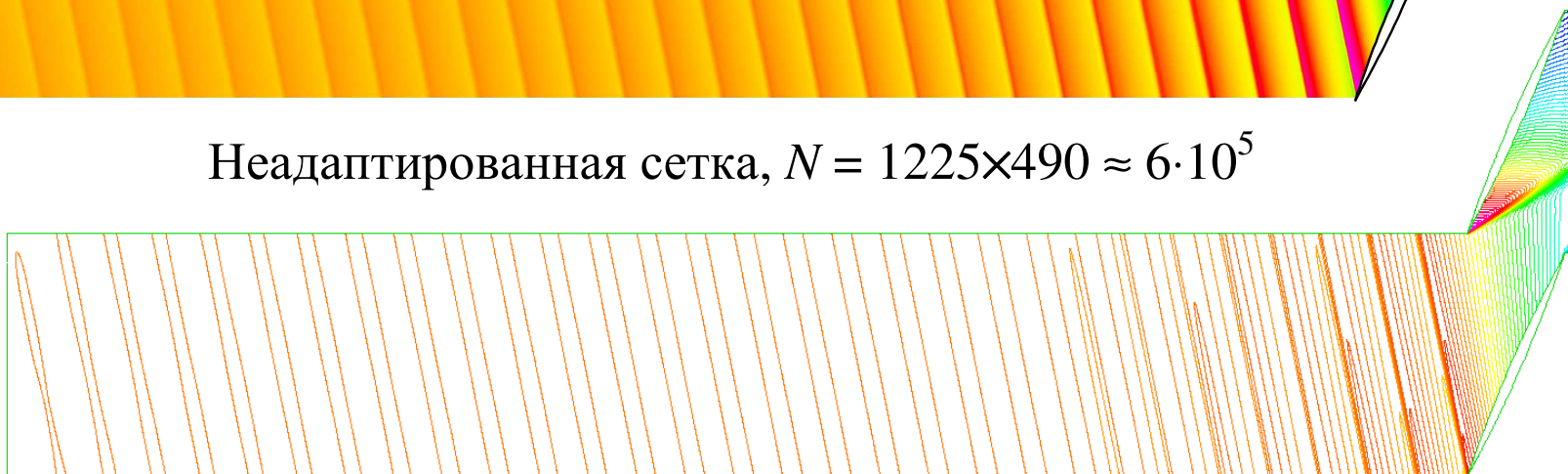
1. **Браилко И.А., Крайко А.Н., Пьянков К.С. и др.** Аэродинамические и акустические характеристики сверхзвуковой вентиляторной решетки с дозвуковой осевой компонентой вектора скорости // *Аэромеханика и газовая динамика*. **2003**. 4. 9-22.
2. **Efremov N.L., Kraiko A.N., Pyankov K.S. et al.** Mathematical simulation of shock-wave structures arising ahead of fan plane cascades and wheels // In "Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics, and Unsteady Aerodynamics". Moscow: Torus press, **2006**. 472 p. 281-294.
3. **Ефремов Н.Л., Крайко А.Н., Пьянков К.С. и др.** Ударно-волновые структуры перед неоднородной вентиляторной решеткой // *Изв. РАН. МЖГ*. **2010**. 2. 135-152.
4. **Bui Trong T.** CFD Analysis of Nozzle Jet Plume Effects on Sonic Boom Signature, NASA Dryden Flight Research Center, California. **2009**. 28 p.



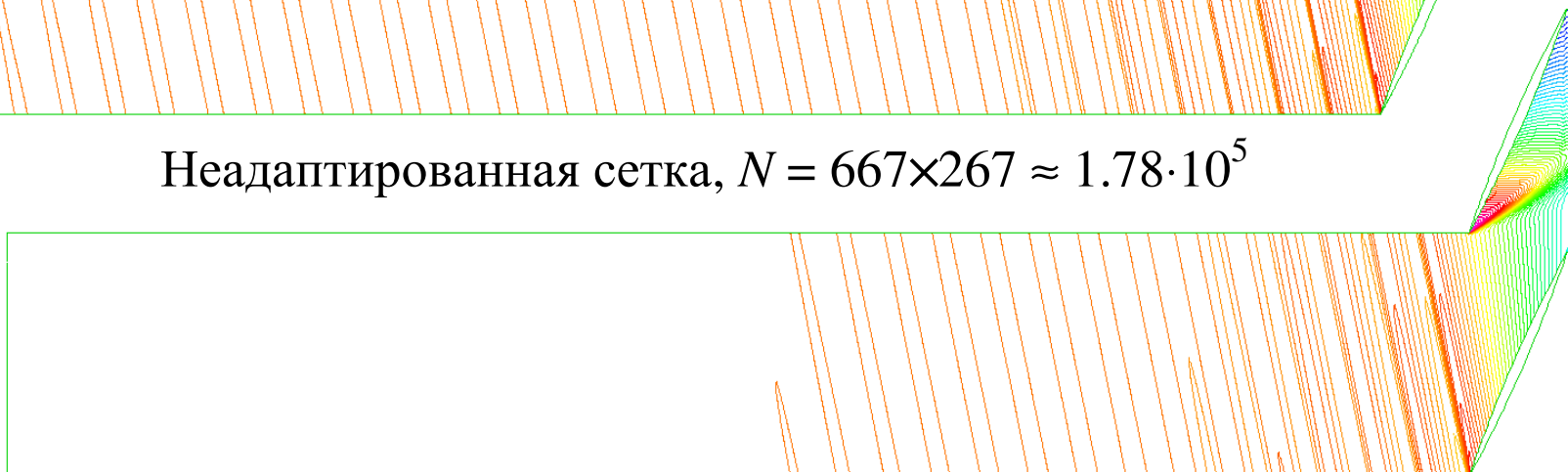
Адаптированная сетка, $N = 9072$

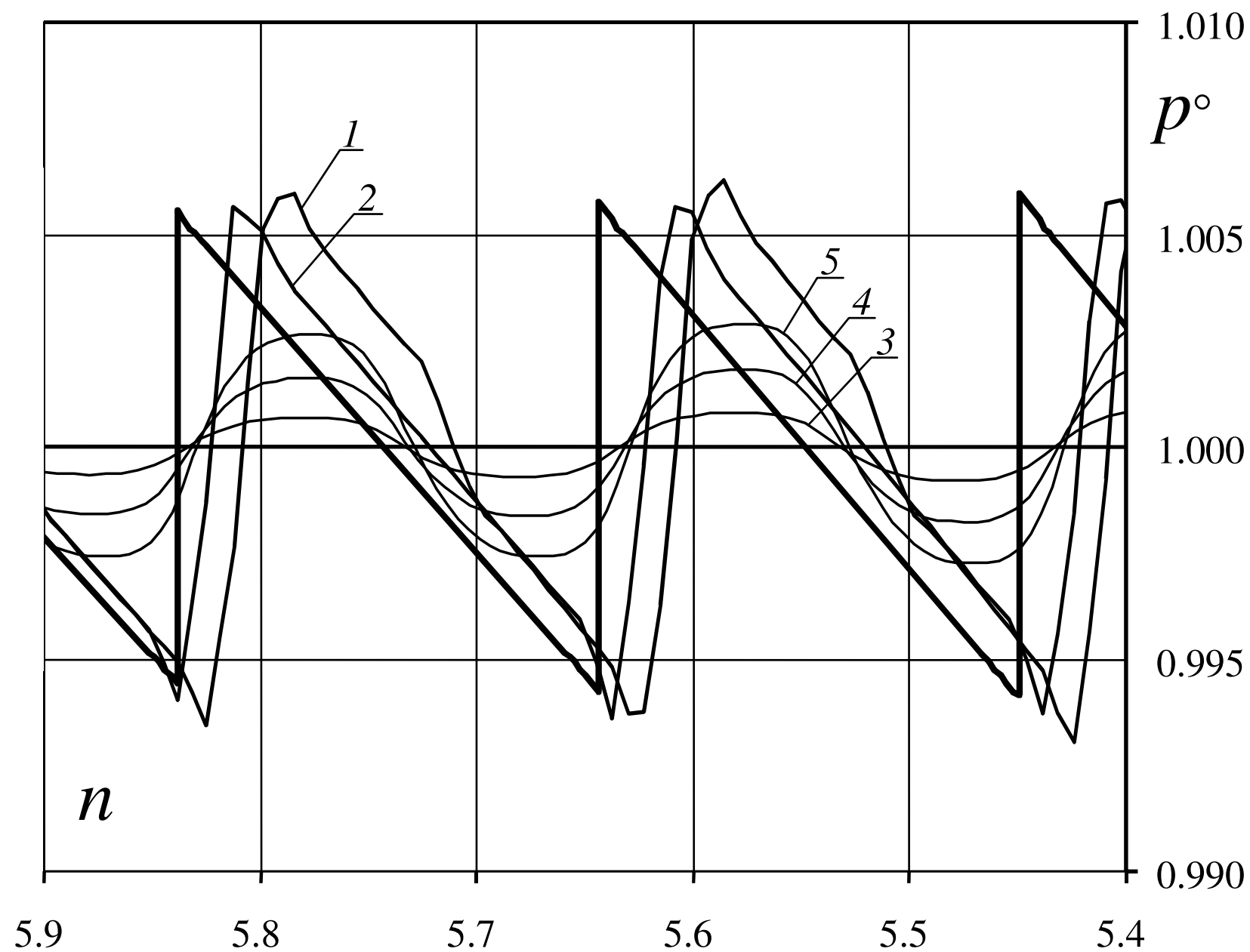


Неадаптированная сетка, $N = 1225 \times 490 \approx 6 \cdot 10^5$



Неадаптированная сетка, $N = 667 \times 267 \approx 1.78 \cdot 10^5$





1. **Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, **1976**. 400 с.
2. **Колган В.П.** Применение принципа минимальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Уч. зап. ЦАГИ. **1972**. **3(6)**. 68-77.
3. **Тилляева Н.И.** Обобщение модифицированной схемы С.К. Годунова на произвольные нерегулярные сетки // Уч. зап. ЦАГИ. **1986**. **17(2)**. 18-26.
4. **Ганжело А.Н., Крайко А.Н., Макаров В.Е., Тилляева Н.И.** О повышении точности решения газодинамических задач // Кн. «Современные проблемы аэро-механики». М.: Машиностроение, **1987**. 201 с. С. 87-102.
5. **Родионов А.В.** Повышение порядка аппроксимации схемы С.К. Годунова // ЖВМиМФ. **1987**. **27(12)**. 1853-1860.





*Благодарю
за внимание*

E-mail: akraiko@ciam.ru