

Numerical Investigation of Experimental Flight Data on Shock Layer Ionization at Velocity 5.34 km/s in Rarefied Atmosphere

Sergey T. Surzhikov^{1,2,3}

¹ *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russia*

² *Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, 127055, Russia*

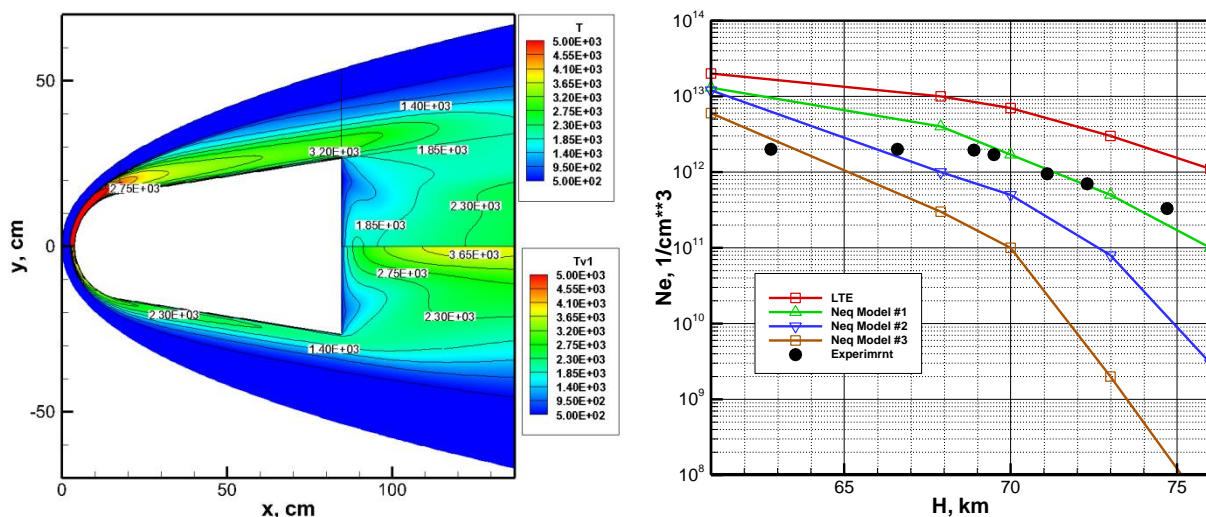
³ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russia*

surg@ipmnet.ru

Abstract

Numerical simulation results for ionization of air shock layer near spherically blunted cone at velocity of 5.34 km/s (the Mach numbers $17 \div 19$) on altitudes $82 \div 48$ km. Comparison with results of flight data [Hayes D., Rotman W. Microwave and Electrostatic Probe Measurements on a Blunt Body Re-Entry Vehicle // AIAA J. 1973. Vol. 11. No. 5. P. 675.] are presented.

Keywords: shock layer ionization, blunted cone, hypersonic velocity, flight experiment.



The left figure: translational temperature (from the top) and vibrational temperature of N₂ (from the bottom) near blunted cone with velocity 5.34 km/s at altitude 67 km.

The right figure: comparison of measured in flight experiment electronic concentrations at different altitudes with calculated data obtained with different models of nonequilibrium dissociation (The model of local thermodynamic equilibrium (LTE), the first and second models of Treanor and Marrone).

УДК 533.92:533.6.01

Расчетный анализ данных летного эксперимента по ионизации сжатого слоя при скорости полета 5.34 км/с в разреженной атмосфере

С.Т. Суржиков^{1,2,3}

¹*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского, Российской академии наук, Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, 101*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н.Л.Духова, Россия, Москва, 127055*

³*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Россия, Москва, 119192*

surg@ipmnet.ru

Аннотация

Представлены результаты численного моделирования ионизации воздуха в сжатом слое у поверхности затупленного по сфере конуса, выполняющего полет на высоте $82 \div 48$ км со скоростью 5.34 км/с, то есть при числах Маха $M \sim 17 \div 19$.

Выполнено сопоставление с результатами летного эксперимента [Hayes D., Rotman W. Microwave and Electrostatic Probe Measurements on a Blunt Body Re-Entry Vehicle // AIAA J. 1973. Vol. 11. No. 5. P. 675].

Ключевые слова: ионизация сжатого слоя, гиперзвуковые скорости полета, затупленный по сфере конус, летный эксперимент.

1. Введение

В работе [1] приведены данные летного эксперимента по ионизации воздуха в сжатом слое у поверхности затупленного по сфере конуса, выполняющего полет на высоте $82 \div 48$ км со скоростью 5.34 км/с, то есть при числах Маха $M \sim 17 \div 19$.

Данный летный эксперимент был реализован при несколько идеализированных для реального гиперзвукового полета условиях. Применялась достаточно простая геометрия и наиболее теплонапряженная область охлаждалась. Это обеспечило наличие достаточно чистой плазмы у поверхности. Было реализовано три летных эксперимента.

Гиперзвуковой летательный аппарат (ГЛА) представлял собой конус затупленный по сфере радиусом 16.1 см. Обтекаемое тело изготовлено из алюминия.

Возвращаемый экспериментальный аппарат поднимался при помощи ракеты Trailblazer-II на высоту около 320 км, откуда он ускорялся вниз по вертикальной траектории до скорости входа в плотные слои атмосферы 5.34 км/с.

Спускаемый аппарат был оснащен серией датчиков, позволяющих получать представление об электронной концентрации частично ионизованного слоя. В критической точке и на некотором удалении вдоль образующей (при $s > 1.81$, где s – продольная координата вдоль образующей конуса) располагались передающая и принимающая на частоте 28.30 МГц радиантенны. Вдоль образующей располагались также электростатические датчики с автоматической регулировкой. В работе [1] показано, что электростатические зонды позволяют

определять локальные характеристики плазмы вблизи поверхности, а радиоантенны позволяют получить представление о распределении электронов в пространстве. Однако при использовании фиксированной частоты зондирующего сигнала удается определить электронную концентрацию лишь в определенной области плазменного объема (в области достижения критической электронной концентрации). Указанные факты необходимо учитывать при попытке сравнения измеренных в летном эксперименте концентраций электронов и рассчитанных с использованием аэрофизических моделей.

Для численной интерпретации результатов летного эксперимента [1] использовался авторский компьютерный код (компьютерная программа) NERAT [2]. Данный авторский код был разработан с целью проведения расчетных исследований неравновесной аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов [2–7]. В указанных работах дана физико-математическая постановка задач и описание метода численного интегрирования полной системы уравнений.

Кинетическая модель процессов неравновесной диссоциации и ионизации, используемая в данной компьютерной программе, была валидирована сравнением с данными летного эксперимента RAM-C-II [8–14]. Для дальнейшего важно, что скорость экспериментального ГЛА в [11–13] была 7.5 км/с, т.е., в зависимости от высоты, числа Маха изменялись в диапазоне $M \sim 24 \div 27$. Характерные числа Рейнольдса составляли $1.6 \times 10^3 \div 2.0 \times 10^4$, так что обтекание можно считать ламинарным.

Подробности использованной в данной работе расчетной модели даны в [2, 8–10].

2. Результаты расчетов

Численное моделирование аэрофизики сжатого слоя вблизи экспериментального гиперзвукового аппарата [1] проводилось для траекторных точек, представленных в табл. 1. Как уже отмечалось, скорость во всех точках была 5.34 км/с.

Распределения концентраций газовых компонент и электронов вдоль критической линии тока для первых 5-ти точек траектории из табл. 1 приведены на рис. 1–5. Представленные результаты получены с использованием модели локального термодинамического равновесия (ЛТР). Это означает, что колебания молекул находятся в термическом равновесии с поступательными степенями свободы.

Таблица 1

Траекторные параметры, для которых проводились расчеты

H , км	T , К	p_∞ , эрг/см ³	ρ_∞ , г/см ³	a , м/с	l , см	N , см ³	p_0 , эрг/см ³
61	244	192	0.273×10^{-6}	313	0.0297	0.568×10^{16}	0.778×10^5
67	228	80.6	0.123×10^{-6}	302	0.0659	0.256×10^{16}	0.350×10^5
70	219	51.0	0.811×10^{-7}	297	0.100	0.169×10^{16}	0.231×10^5
73	212	31.8	0.523×10^{-7}	292	0.156	0.109×10^{16}	0.149×10^5
76	206	19.5	0.330×10^{-7}	288	0.246	0.687×10^{15}	0.940×10^4
79	200	11.8	0.206×10^{-7}	284	0.394	0.428×10^{15}	0.587×10^4

На этих же рисунках приведены концентрации электронов, рассчитанные с использованием трех моделей неравновесной диссоциации. В первой модели (на рисунках – “NeqModel#1”) предполагалась равная вероятность диссоциации со всех возбужденных колебательных состояний. Это так называемая 1-я модель Тринора – Мэрроуна [15]. Во второй (“NeqModel#2”) и третьей моделях (“NeqModel#3”) использовалась вторая кинетическая модель Мэрроуна – Тринора [16]. Параметр, задающий преимущественную вероятность диссоциации с верхних колебательных состояний задавался соответственно равным $U = 3$ и 6.

Константа скорости ассоциативной ионизации в использованной кинетической модели (приведена в [9]) соответствовала модели Парка [17].

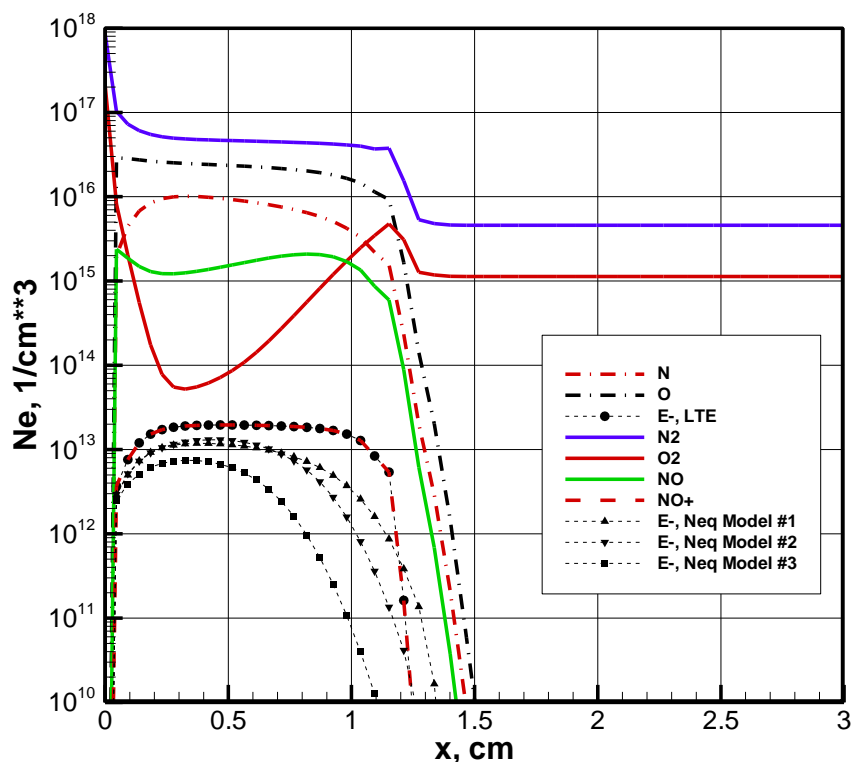


Рис. 1. Распределение концентраций газовых компонент вдоль критической линии тока на высоте $H=61$ км. Модель ЛТР. Концентрации электронов для модели ЛТР и трех моделей неравновесной диссоциации

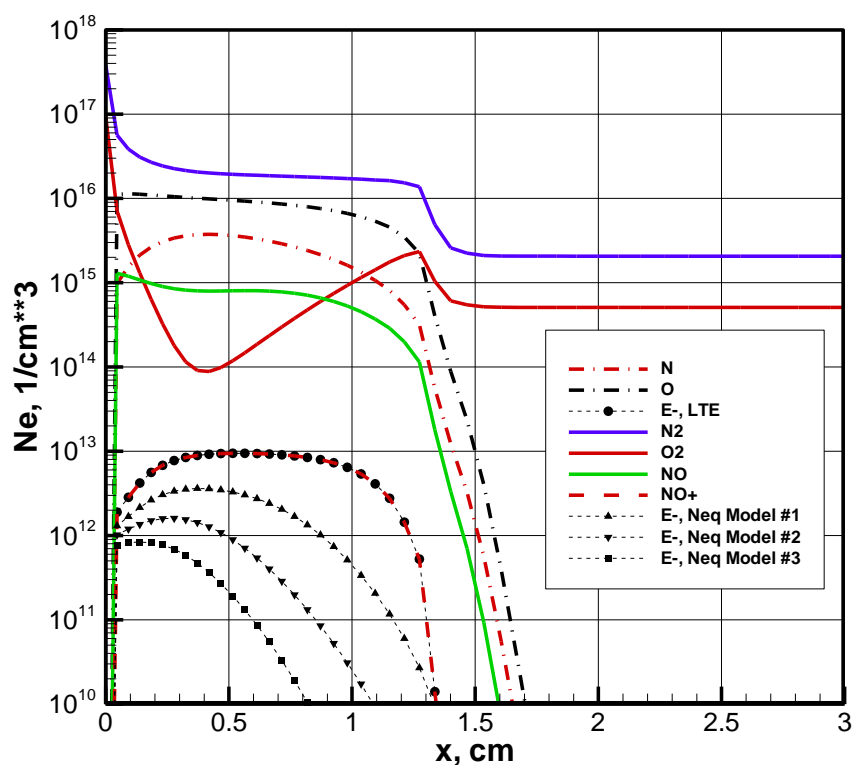


Рис. 2. Распределение концентраций газовых компонент вдоль критической линии тока на высоте $H=67$ км. Модель ЛТР. Концентрации электронов для модели ЛТР и трех моделей неравновесной диссоциации

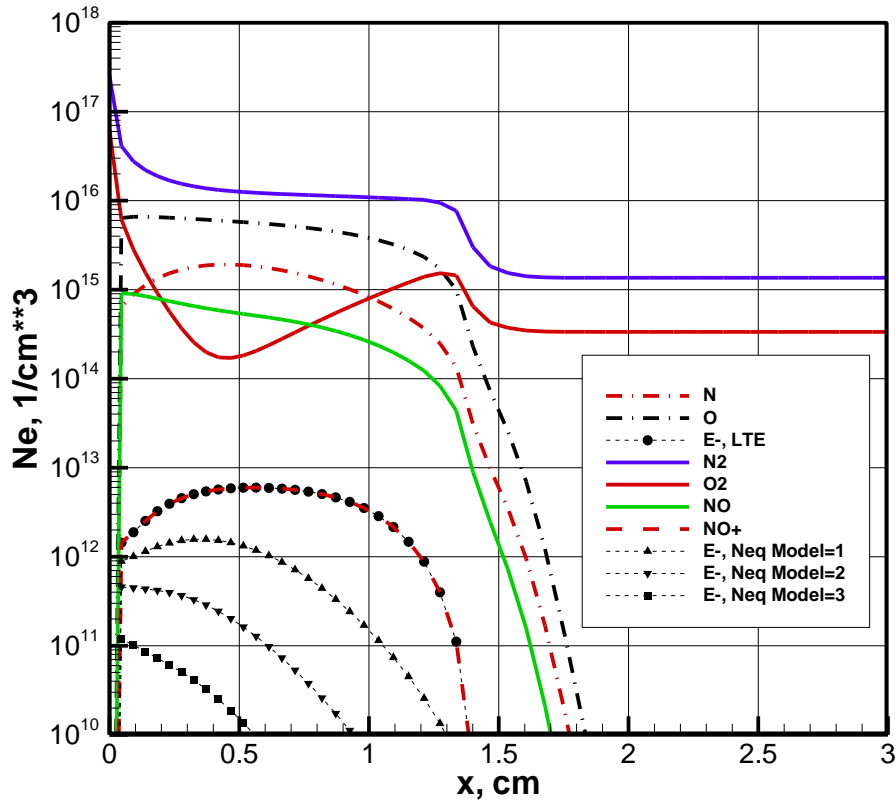


Рис. 3. Распределение концентраций газовых компонент вдоль критической линии тока на высоте $H=70$ км. Модель ЛТР. Концентрации электронов для модели ЛТР и трех моделей неравновесной диссоциации

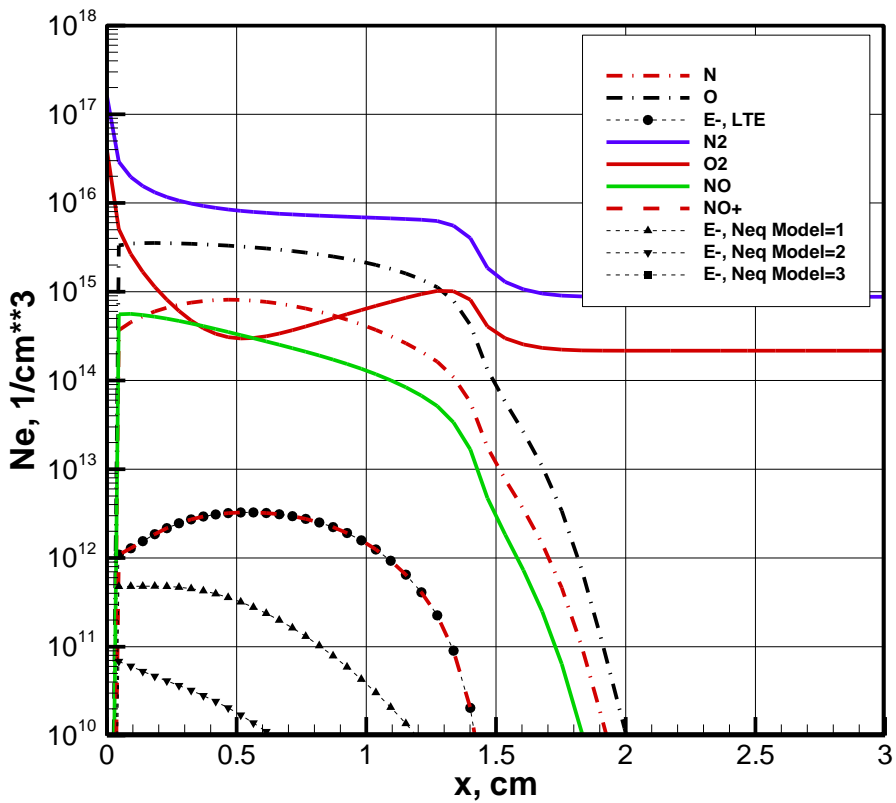


Рис. 4. Распределение концентраций газовых компонент вдоль критической линии тока на высоте $H=73$ км. Модель ЛТР. Концентрации электронов для модели ЛТР и трех моделей неравновесной диссоциации

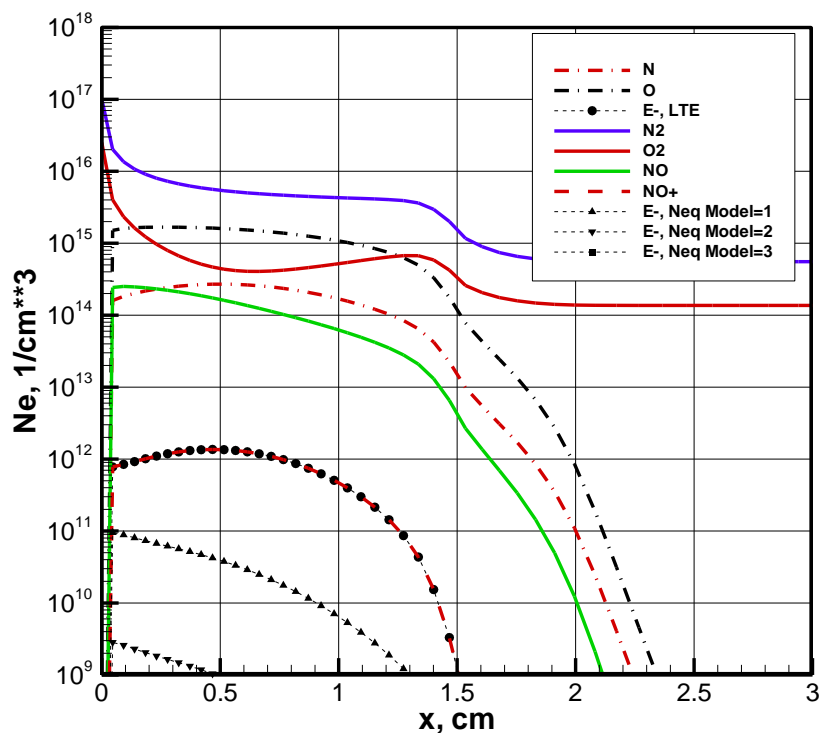


Рис. 5. Распределение концентраций газовых компонент вдоль критической линии тока на высоте $H=76$ км. Модель ЛТР. Концентрации электронов для модели ЛТР и трех моделей неравновесной диссоциации

Для всех расчетных данных наблюдается общая тенденция снижения электронной концентрации при переходе от модели ЛТР последовательно к моделям неравновесной диссоциации #1–3.

Отметим также снижение электронной концентрации по мере увеличения высоты полета (рис. 6).

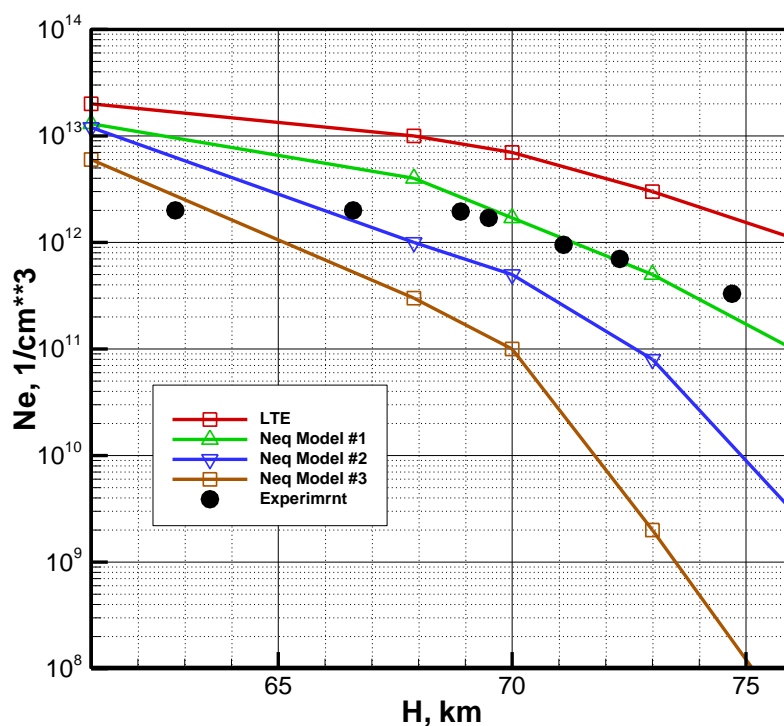


Рис. 6. Сравнение расчетных электронных концентраций с летными данными

Из табл. 1 видно, что по мере увеличения высоты полета условия в сжатом слое становятся все более неравновесными. Об этом свидетельствует, в первую очередь, увеличение разрежения набегающего газа (падение давления и плотности) и значительное уменьшение давления торможения p_0 . На рис. 7–11 хорошо видно, что различия между поступательной и колебательными температурами вдоль критической линии тока значительно возрастают при увеличении высоты полета. Заметим, что даже на наименьшей из исследованных высот термическое равновесие в сжатом слое отсутствует (см. рис. 7).

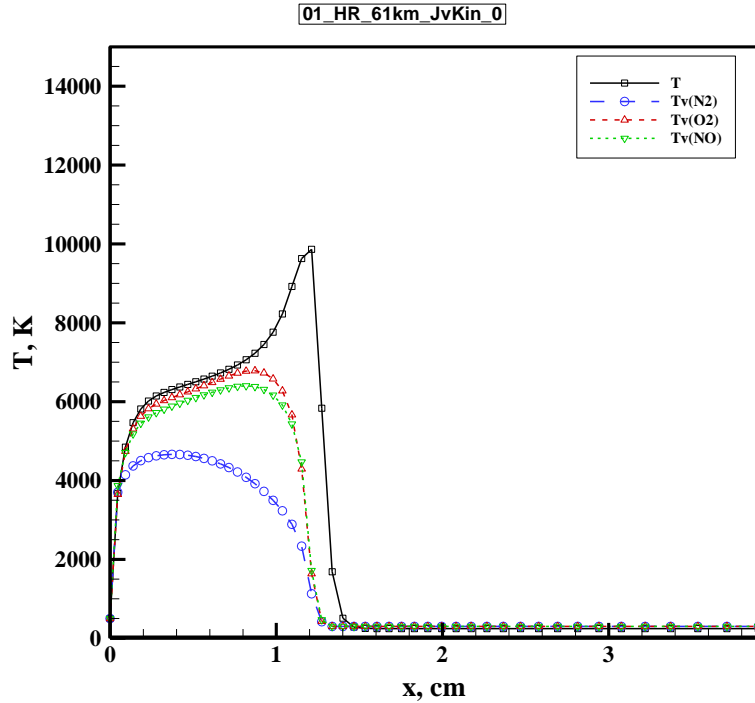


Рис. 7. Распределение поступательной и колебательных температур вдоль критической линии тока на высоте $H=61$ км. Модель ЛТР

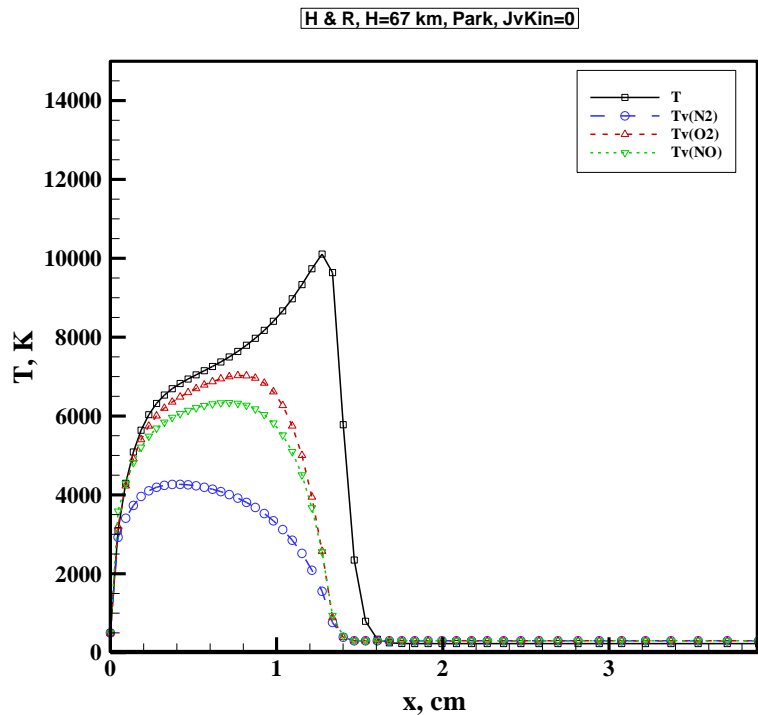


Рис. 8. Распределение поступательной и колебательных температур вдоль критической линии тока на высоте $H=61$ км. Модель ЛТР

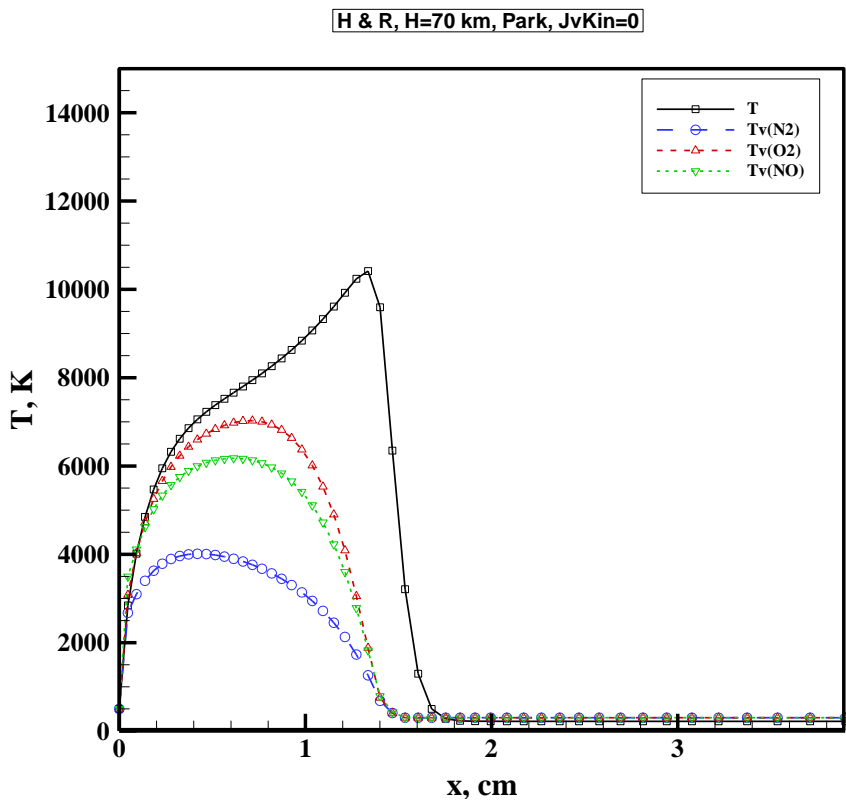


Рис. 9. Распределение поступательной и колебательных температур вдоль критической линии тока на высоте $H = 61$ км. Модель ЛТР

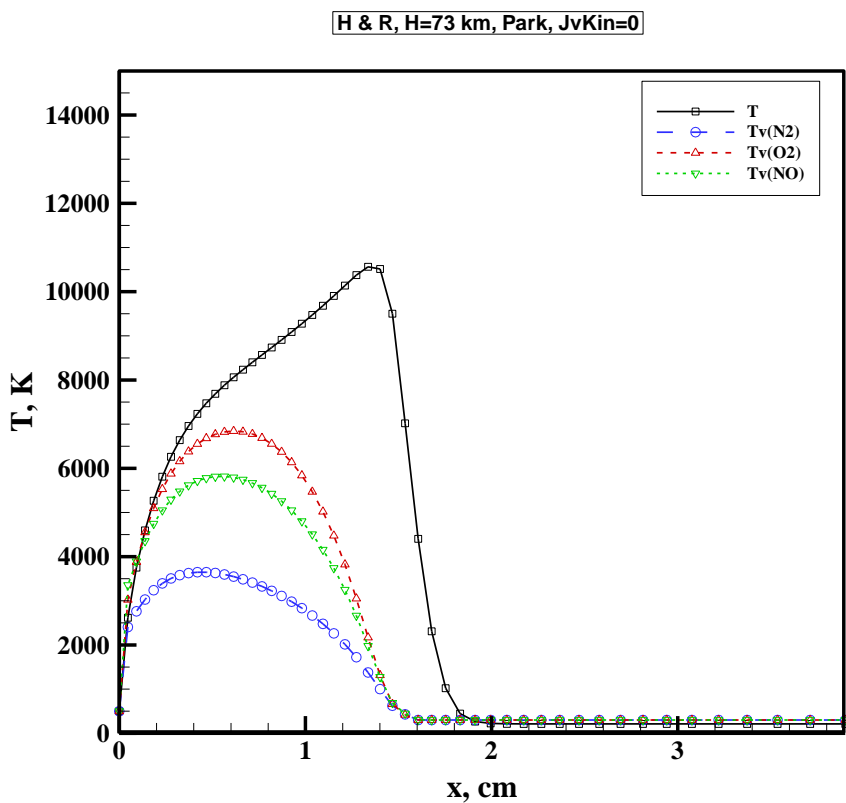


Рис. 10. Распределение поступательной и колебательных температур вдоль критической линии тока на высоте $H = 61$ км. Модель ЛТР

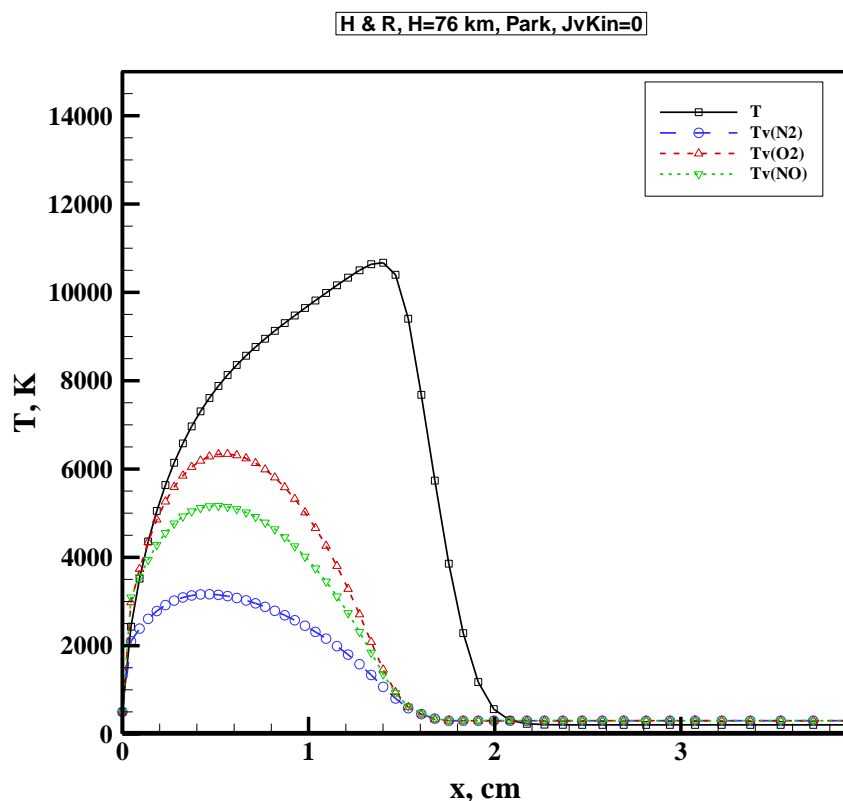


Рис. 11. Распределение поступательной и колебательных температур вдоль критической линии тока на высоте $H = 61$ км. Модель ЛТР

Сравнение результатов расчетов с летными данными показывает, что наиболее адекватное описание экспериментальных данных достигается при использовании кинетической модели #1. Как уже отмечалось, при сравнении расчетных и экспериментальных данных следует учитывать, что на рис. 6 приведены максимальные концентрации электронов на критической линии тока (взяты из распределений на рис. 1–5), а экспериментальные значения соответствуют показаниям электростатических зондов, т.е. практически отвечают электронной концентрации вблизи поверхности.

Этим, в частности, объясняется заметное расхождение расчетных и экспериментальных данных при малых высотах, где наблюдается наибольшая плотность электронов. Численное подтверждение этому состоит в том, что экспериментальные значения электронной концентрации практически не меняются при высотах более 69 км.

Отметим значительное расхождение расчетных данных между собой при больших высотах. Указанный разброс между этими данными значительно выше, чем наблюдался при интерпретации экспериментальных данных RAM-C-II.

Учитывая, что высоты полета для этих двух экспериментов близки, можно сделать вывод, что главной причиной указанного расхождения является заметно меньшая скорость ГЛА в экспериментах [1].

Это выдвигает требование необходимости проведения дополнительных исследований реакции ассоциативной ионизации при относительно меньших энергиях реагентов.

Отмеченное выше расхождение расчетных данных для критической линии тока наглядно демонстрируется также для распределений электронных концентраций вдоль образующей затупленного по сфере конуса (рис. 12–16).

Общее представление о распределении концентраций газовых компонент и электронов в исследованных траекторных точках дают рис. 17–31. А на рис. 32–36 показаны распределения поступательной и колебательных температур молекул N_2 .

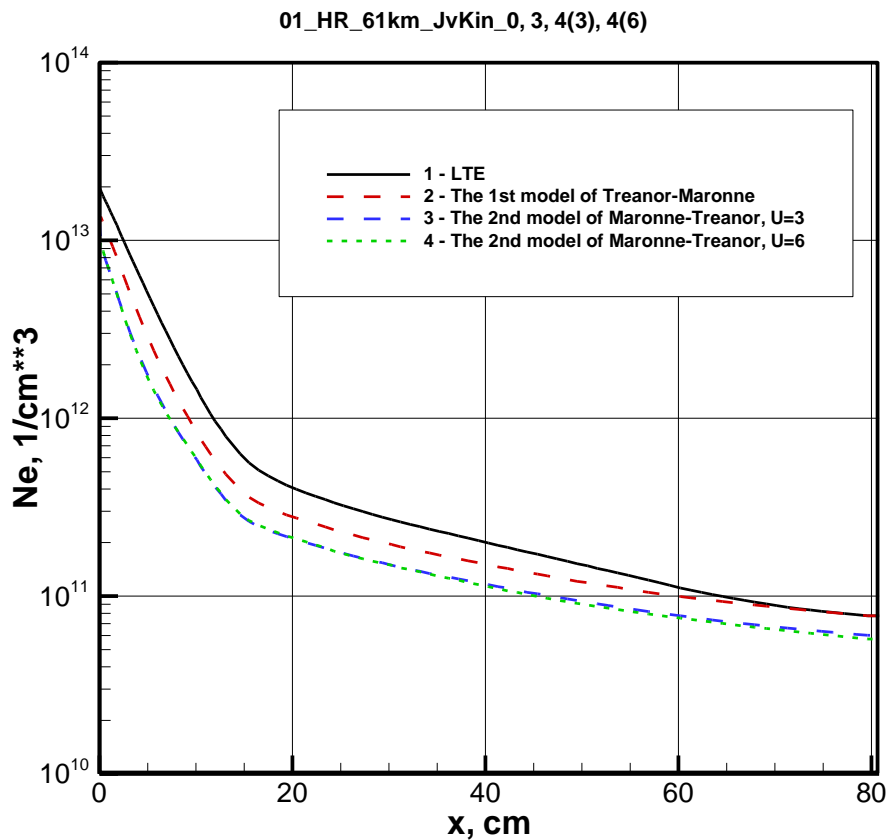


Рис. 12. Распределение концентраций электронов вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 61$ км

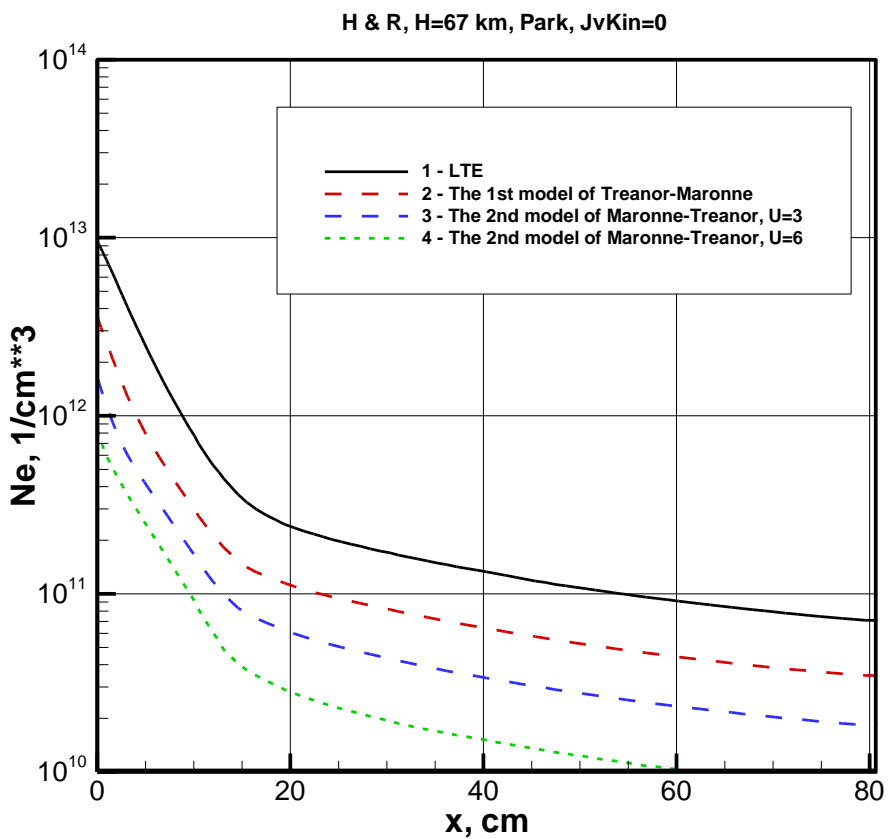


Рис. 13. Распределение концентраций электронов вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 67$ км

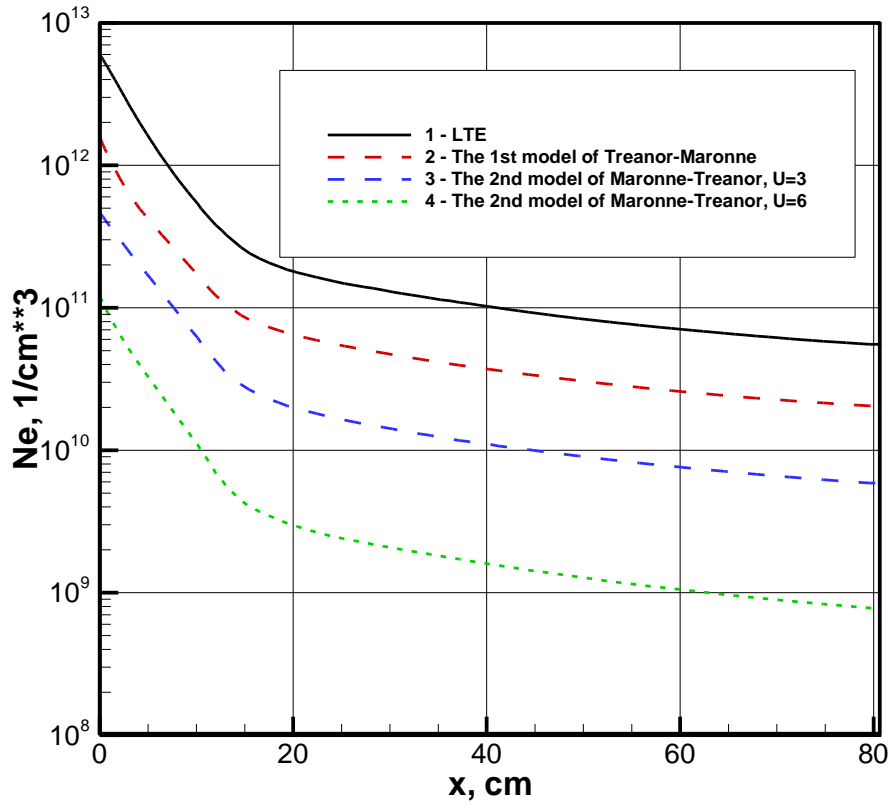


Рис. 14. Распределение концентраций электронов вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 67$ км

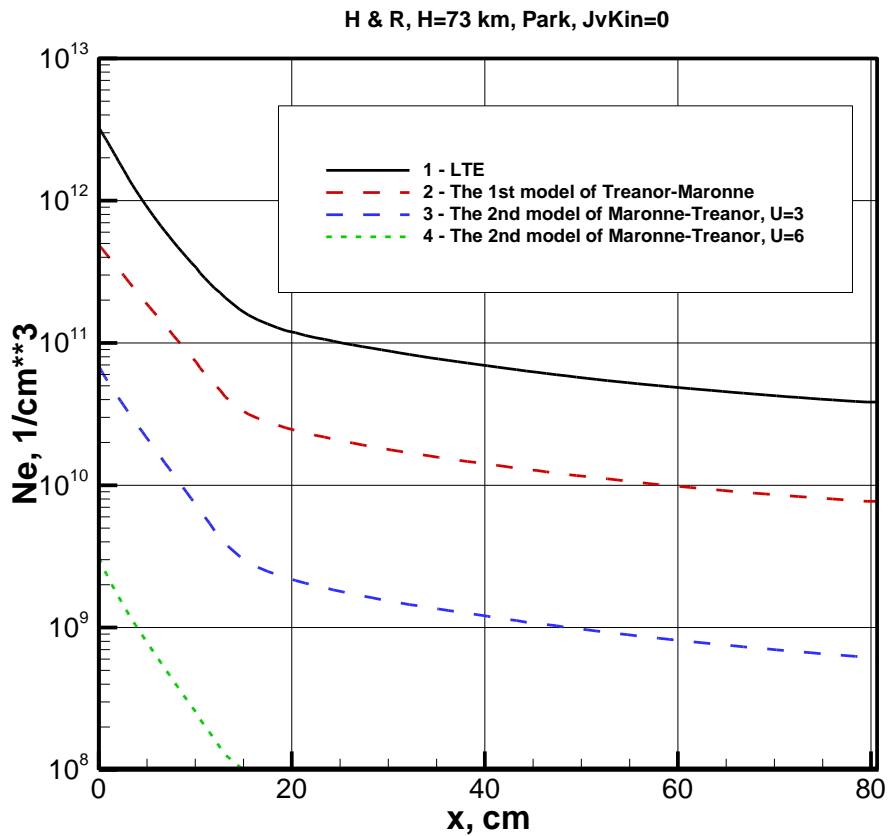


Рис. 15. Распределение концентраций электронов вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 73$ км

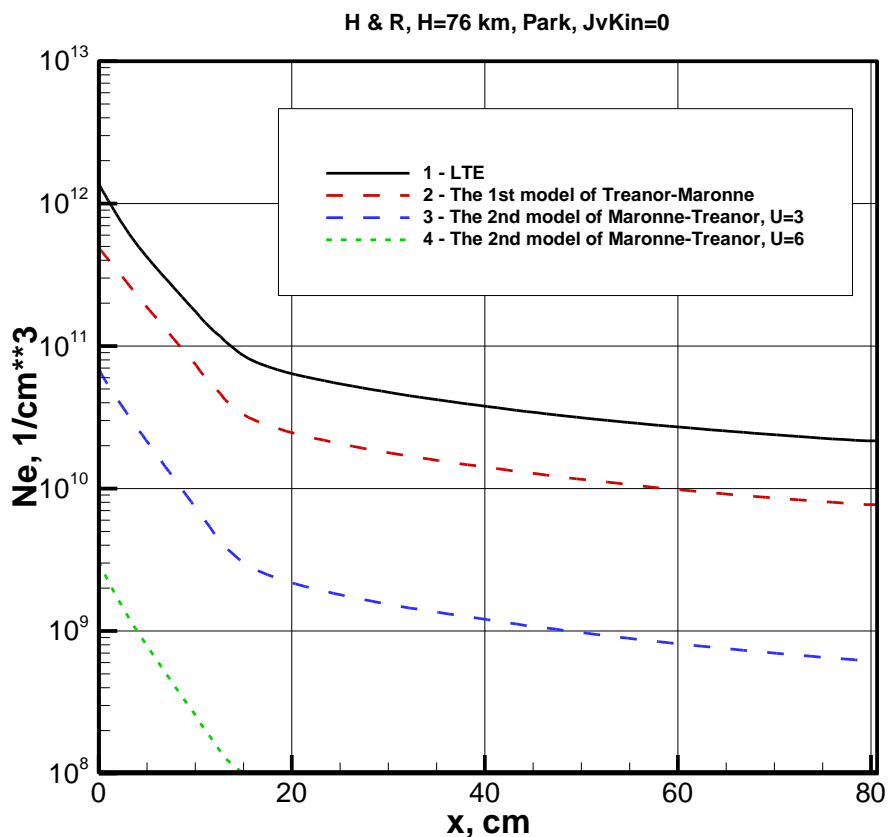


Рис. 16. Распределение концентраций электронов вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 76$ км

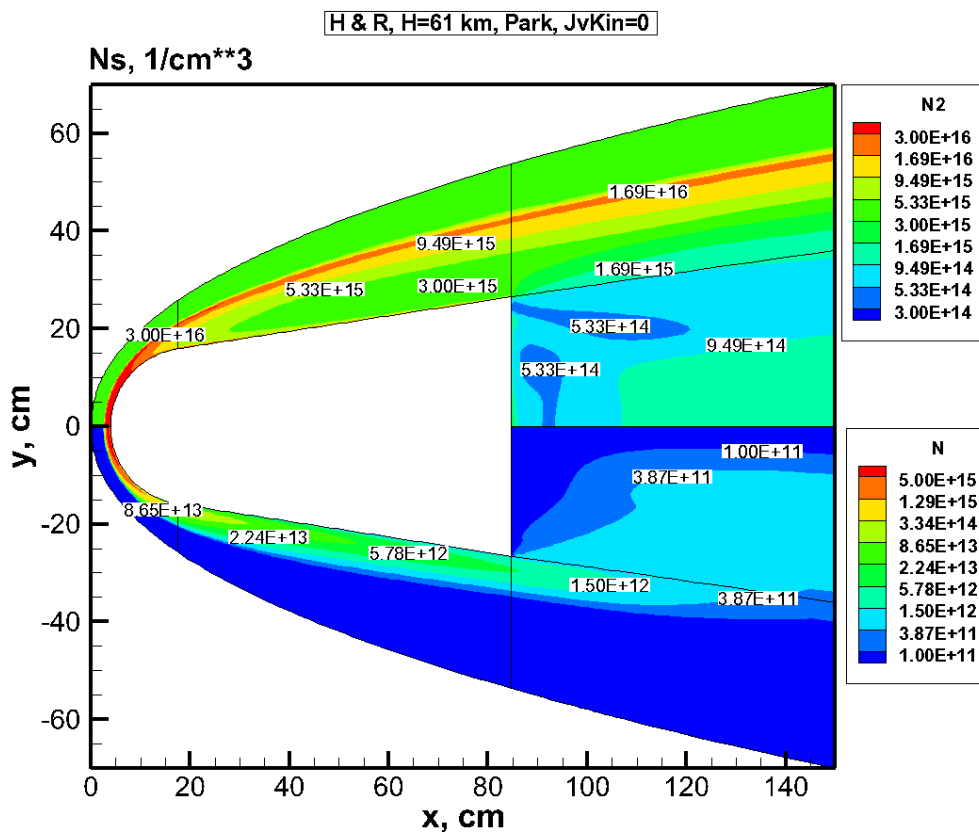


Рис. 17. Концентрация молекулярного и атомарного азота на высоте $H = 61$ км. Модель ЛТР

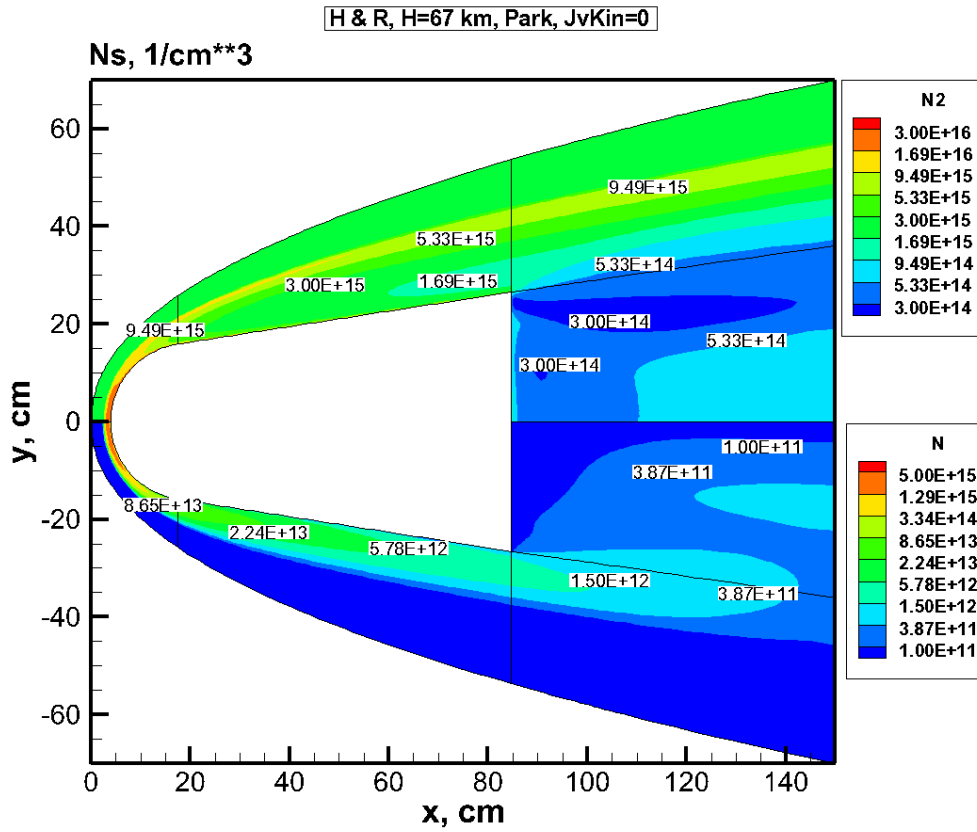


Рис. 18. Концентрация молекулярного и атомарного азота на высоте $H=67$ км. Модель ЛТР

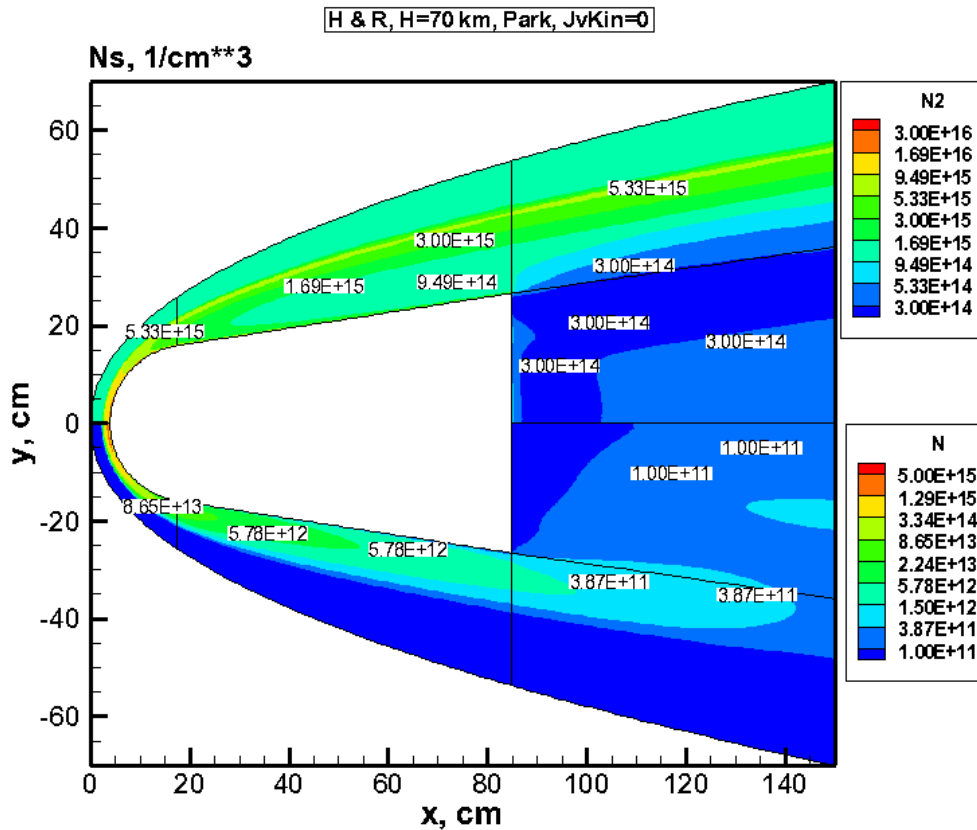


Рис. 19. Концентрация молекулярного и атомарного азота на высоте $H=70$ км. Модель ЛТР

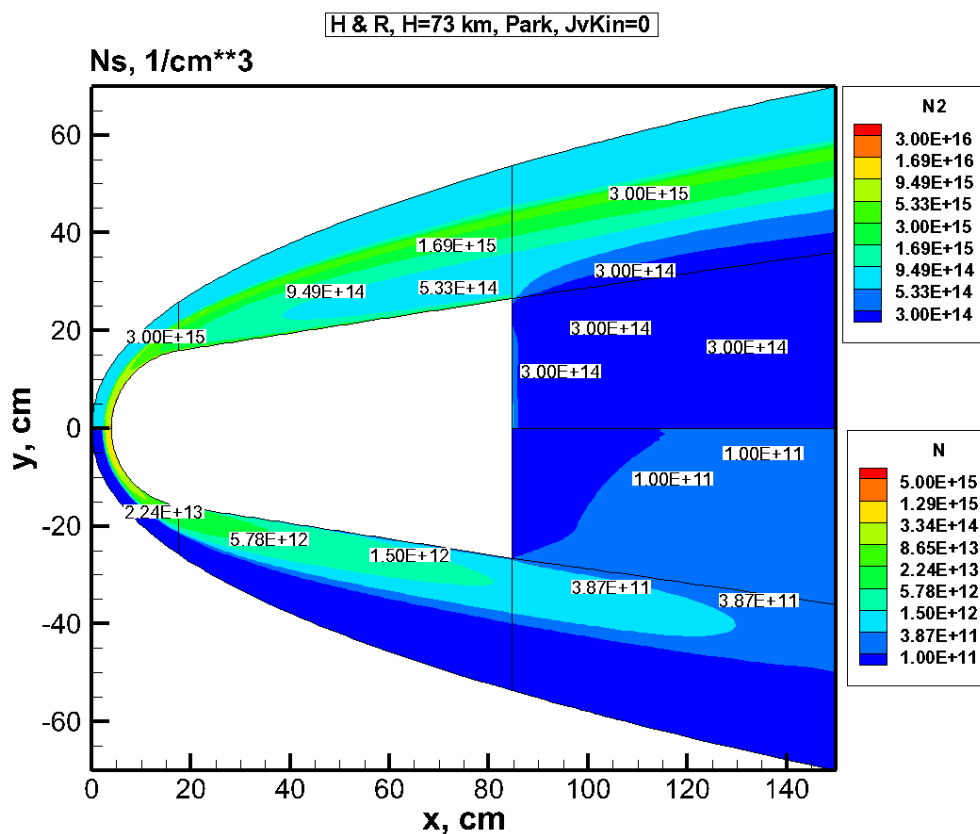


Рис. 20. Концентрация молекулярного и атомарного азота на высоте $H = 73$ км. Модель ЛТР

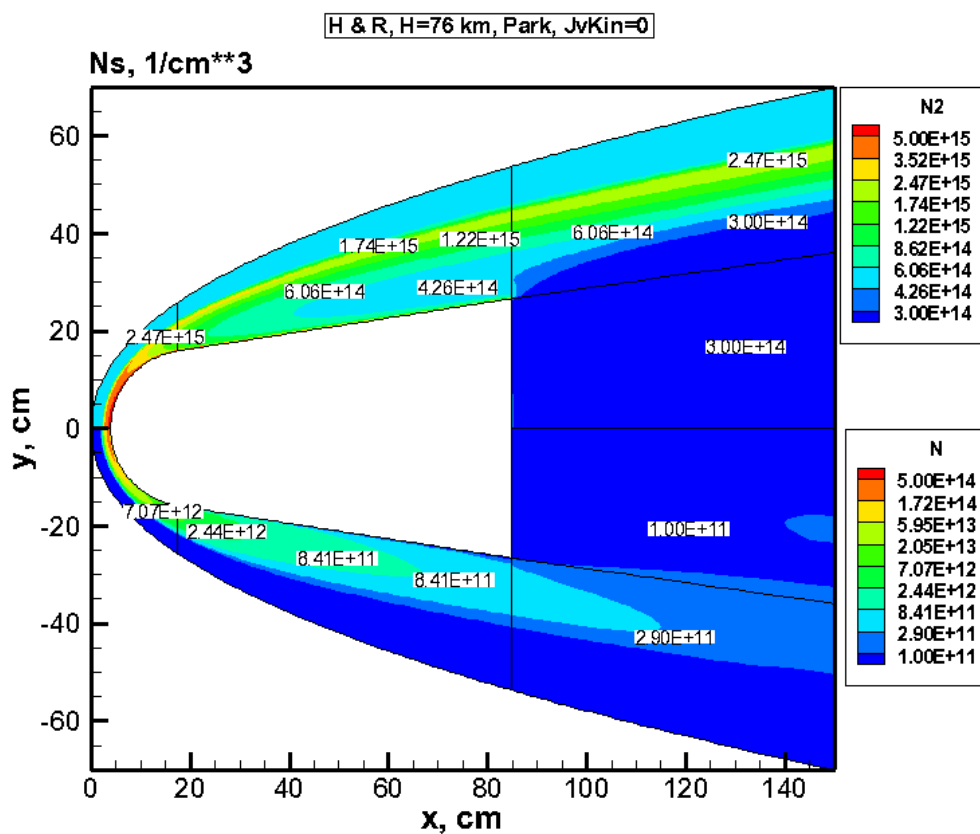


Рис. 21. Концентрация молекулярного и атомарного азота на высоте $H = 76$ км. Модель ЛТР

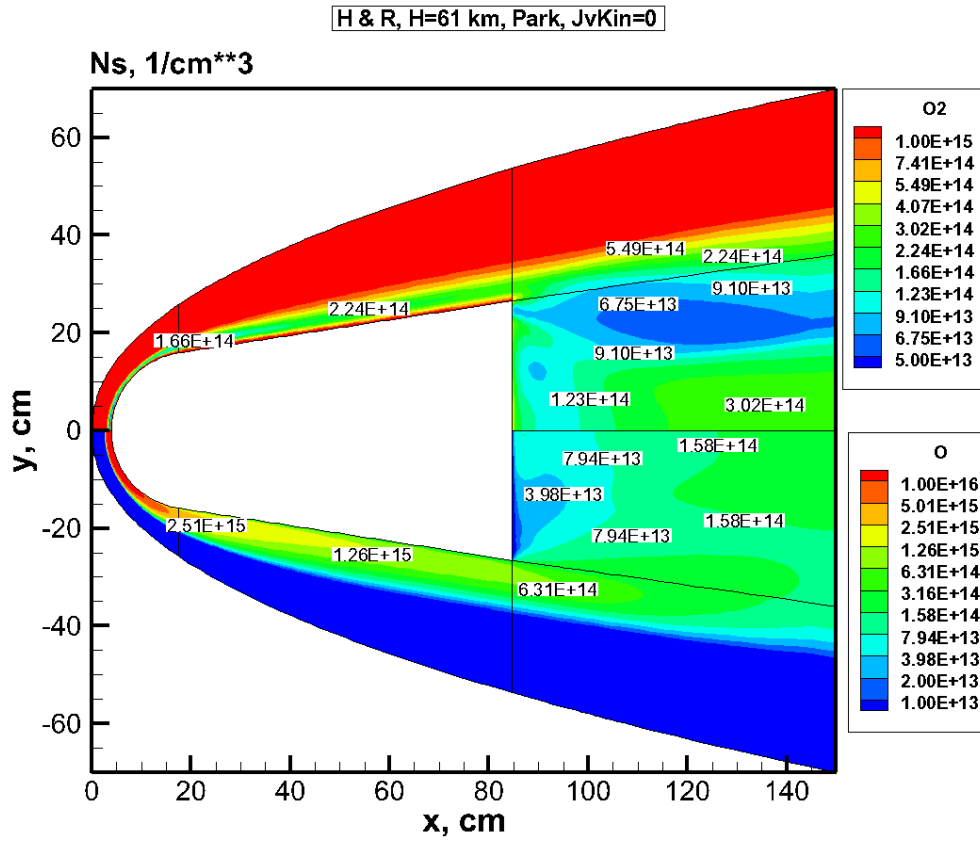


Рис. 22. Концентрация молекулярного и атомарного кислорода на высоте $H=61$ км. Модель ЛТР

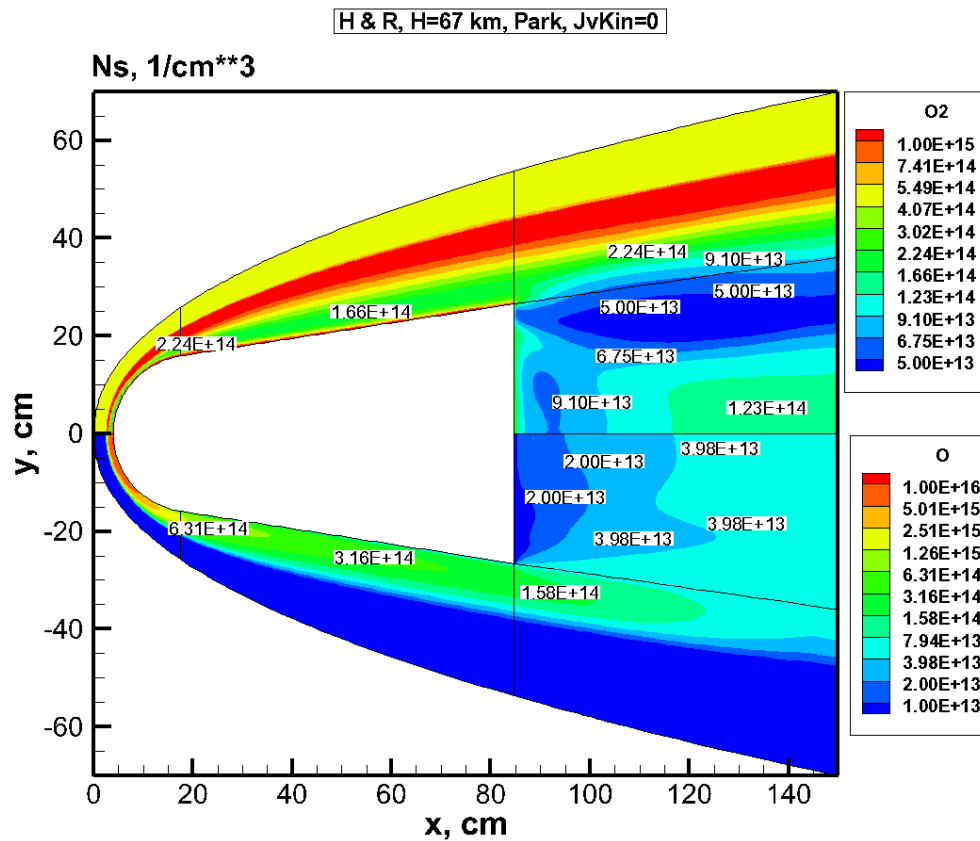


Рис. 23. Концентрация молекулярного и атомарного кислорода на высоте $H=67$ км. Модель ЛТР

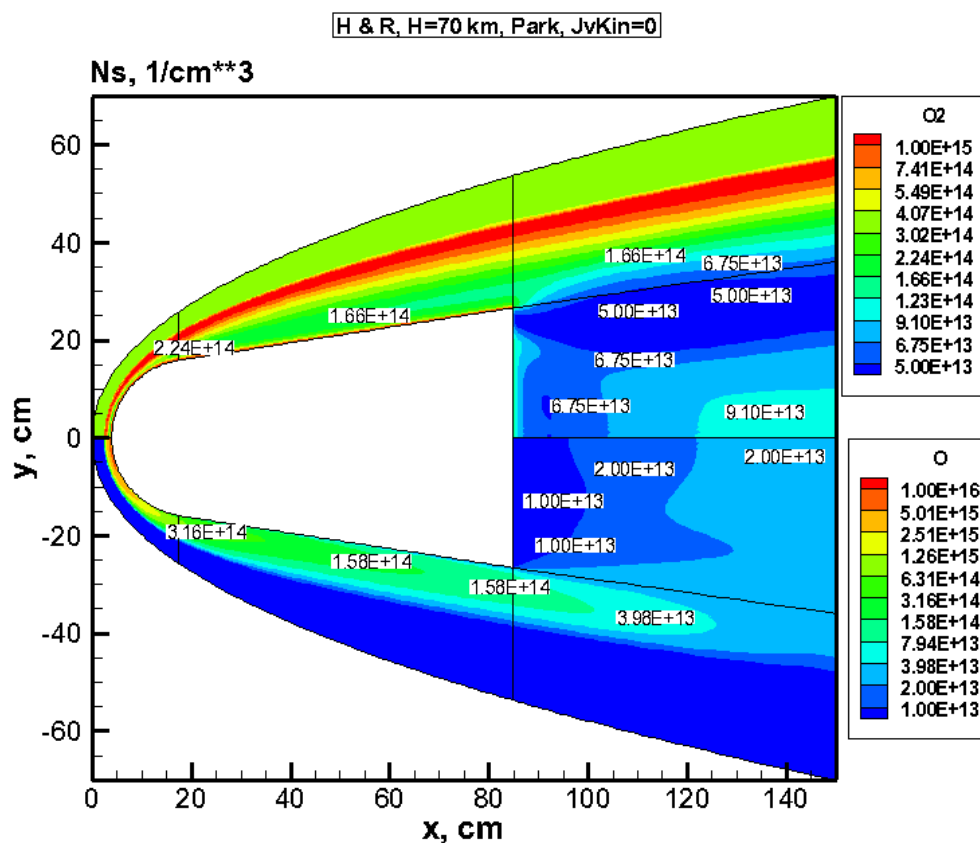


Рис. 24. Концентрация молекулярного и атомарного кислорода на высоте $H = 70$ км. Модель ЛТР

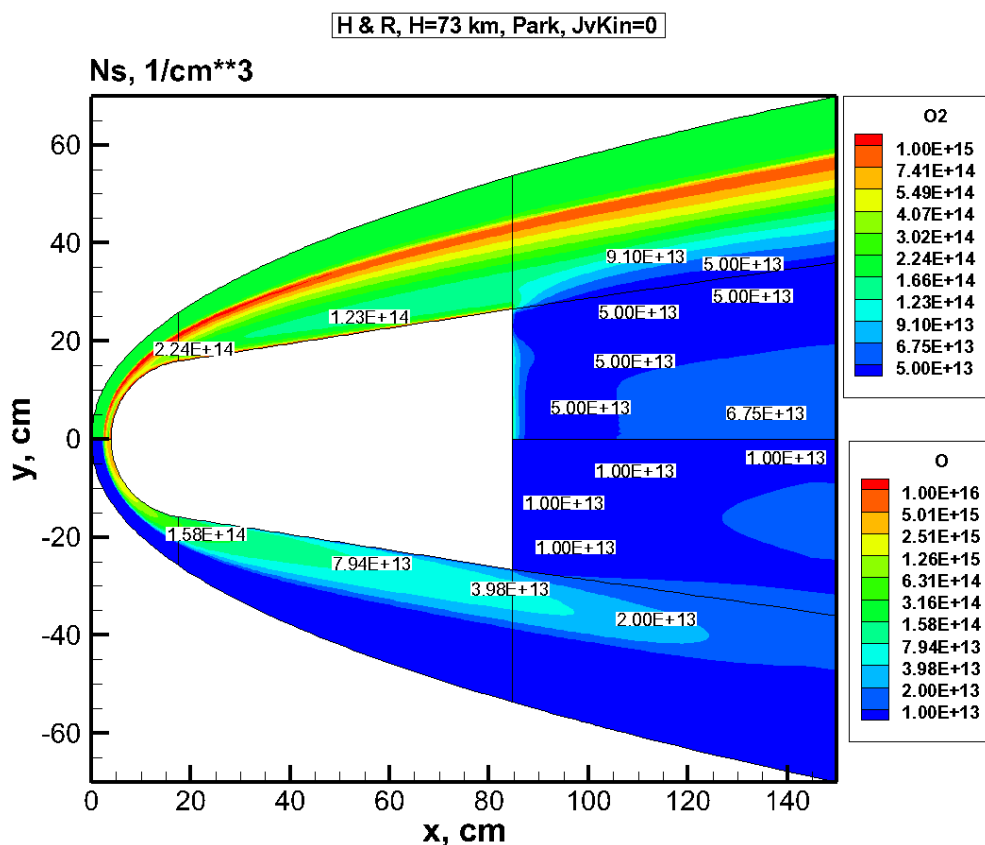


Рис. 25. Концентрация молекулярного и атомарного кислорода на высоте $H = 73$ км. Модель ЛТР

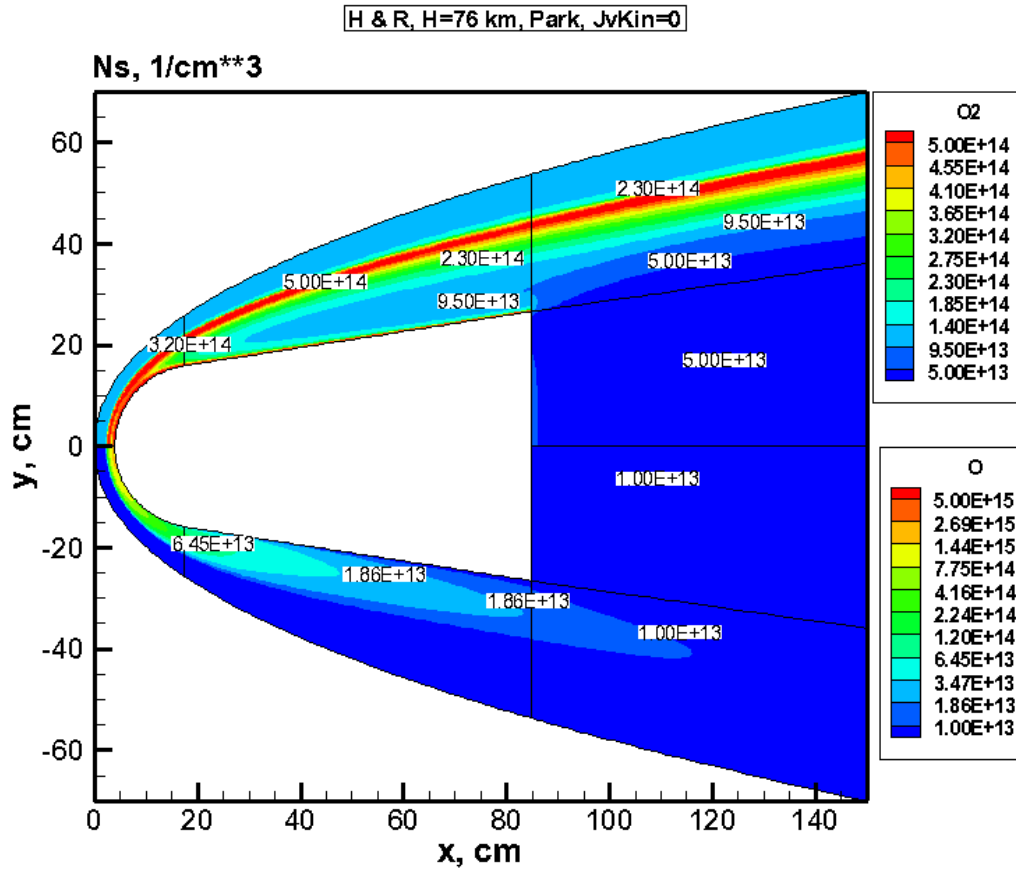


Рис. 26. Концентрация молекулярного и атомарного кислорода на высоте $H=76$ км. Модель ЛТР

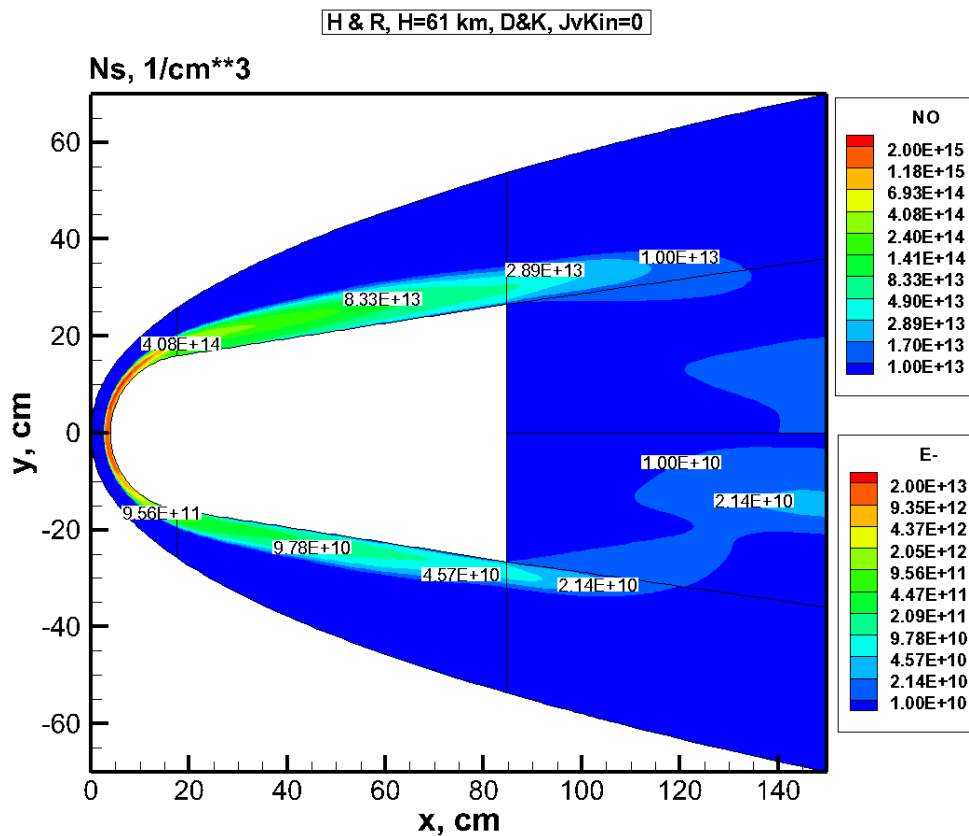


Рис. 27. Концентрация оксида азота и электронов на высоте $H=61$ км. Модель ЛТР

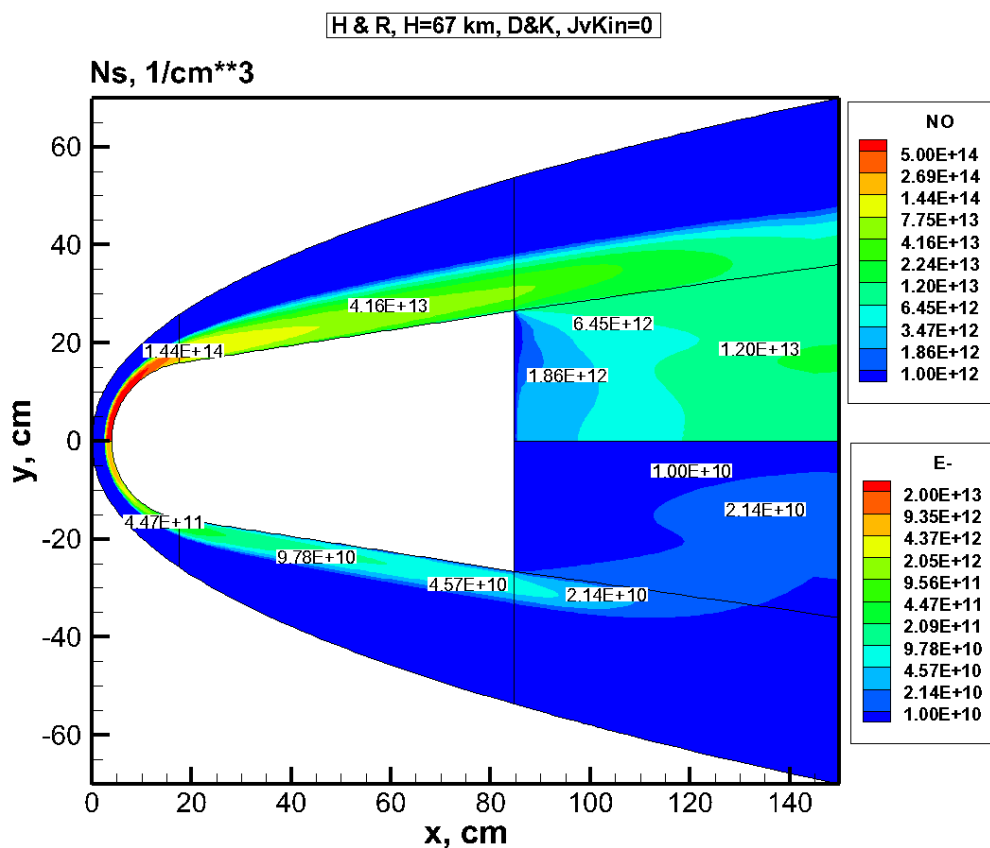


Рис. 28. Концентрация оксида азота и электронов на высоте $H=67$ км. Модель ЛТР

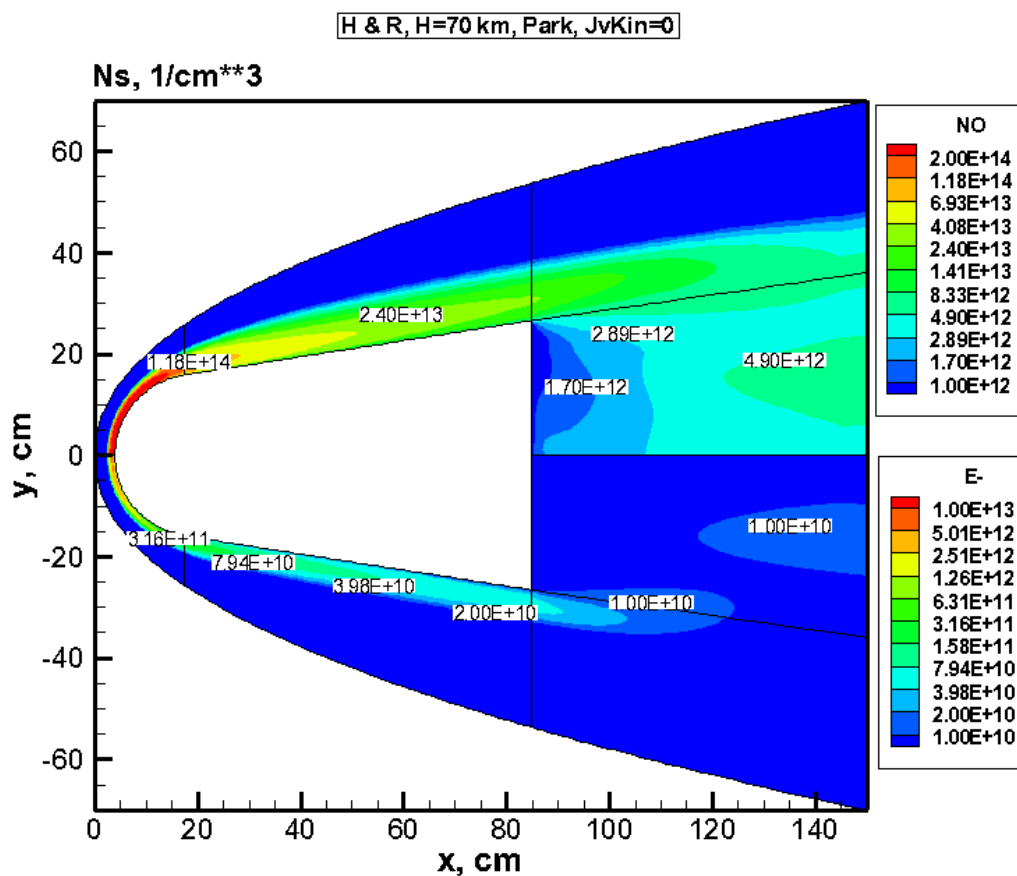


Рис. 29. Концентрация оксида азота и электронов на высоте $H=70$ км. Модель ЛТР

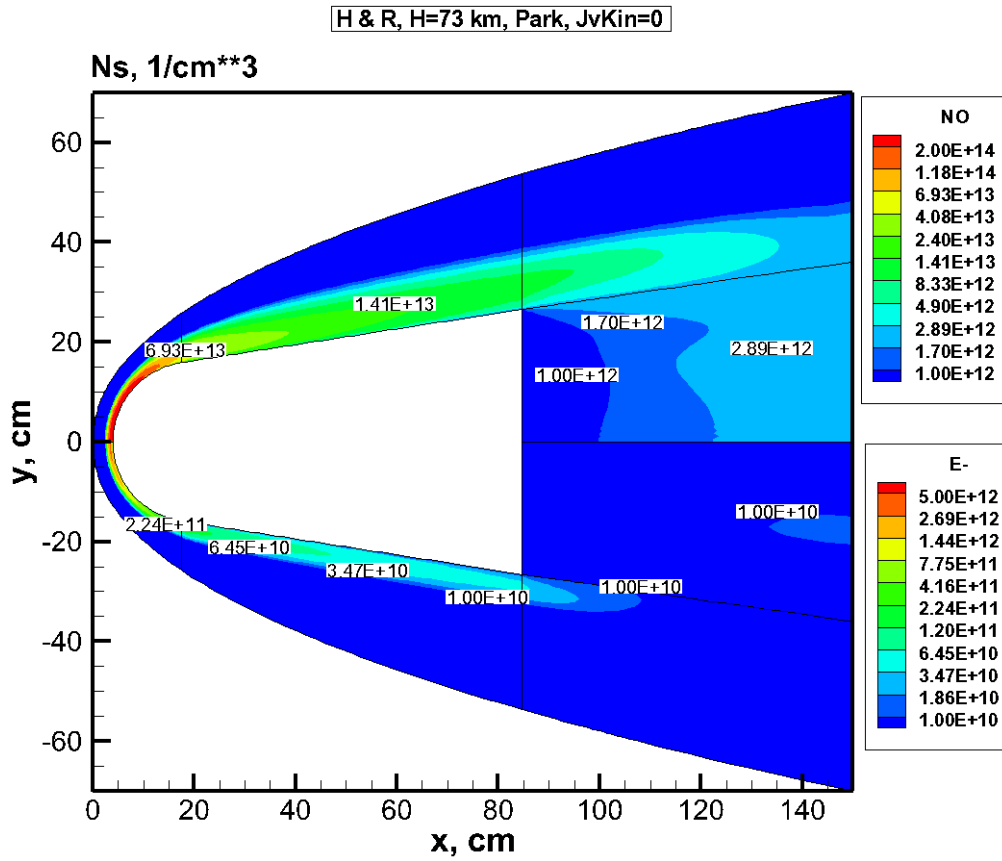


Рис. 30. Концентрация оксида азота и электронов на высоте $H=73$ км. Модель ЛТР

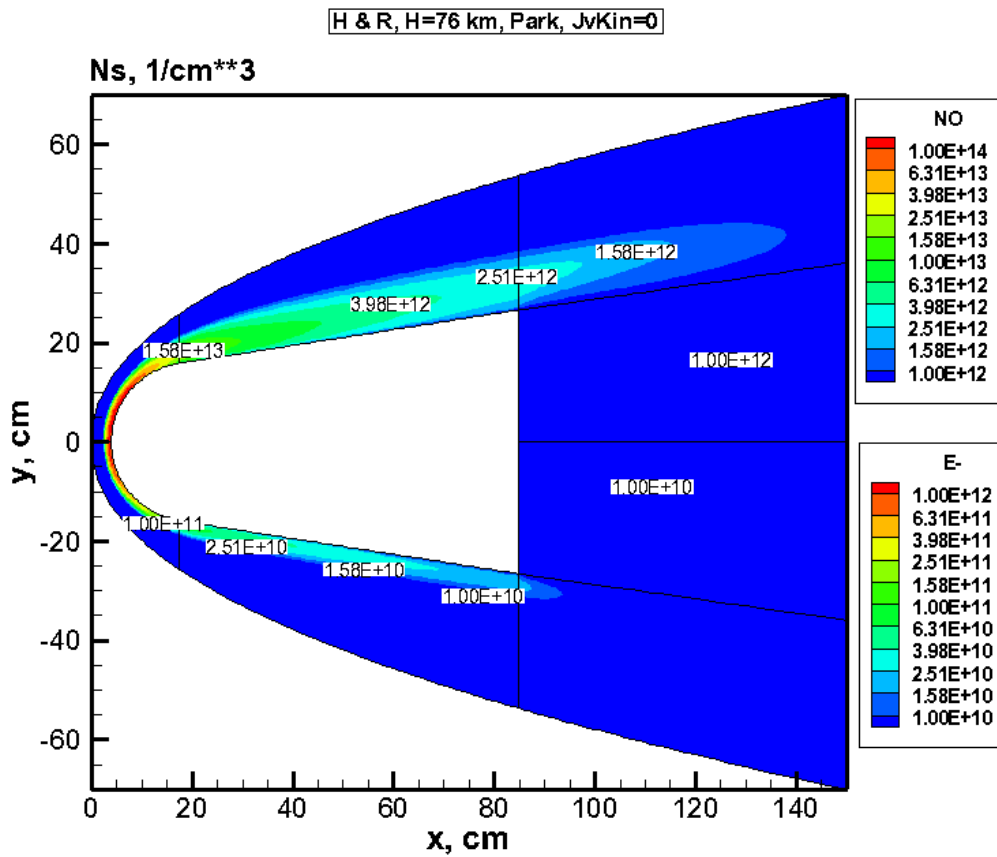


Рис. 31. Концентрация оксида азота и электронов на высоте $H=76$ км. Модель ЛТР

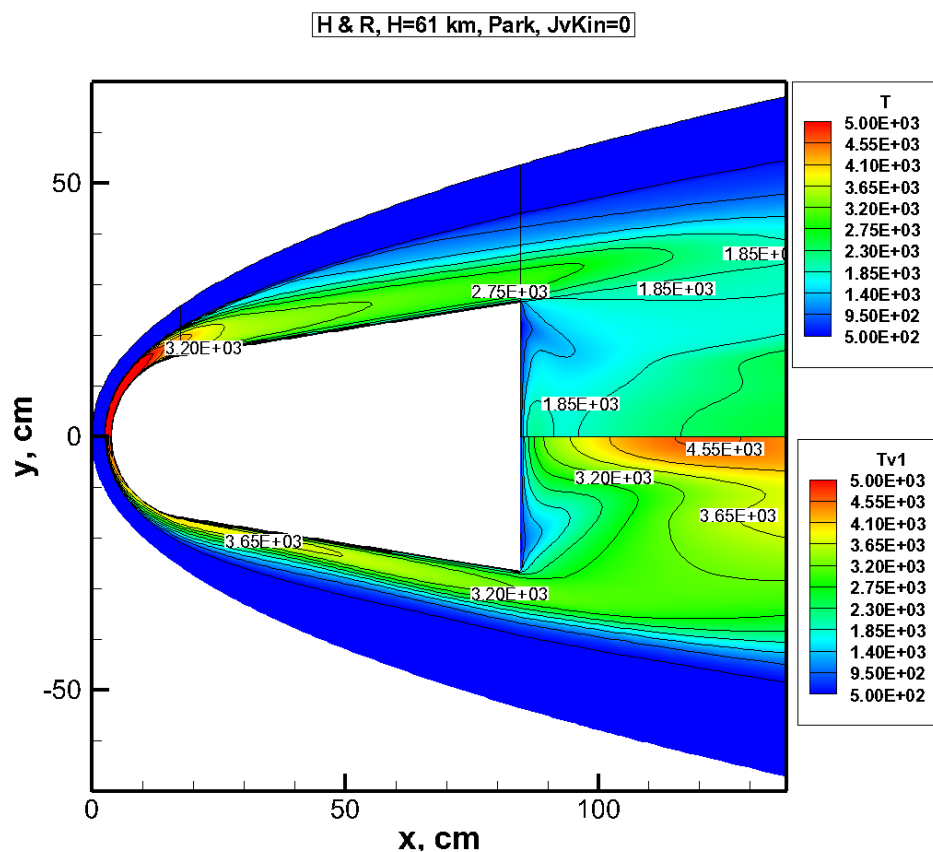


Рис. 32. Поступательная и колебательная температура N_2 на высоте $H=61$ км. Модель ЛТР

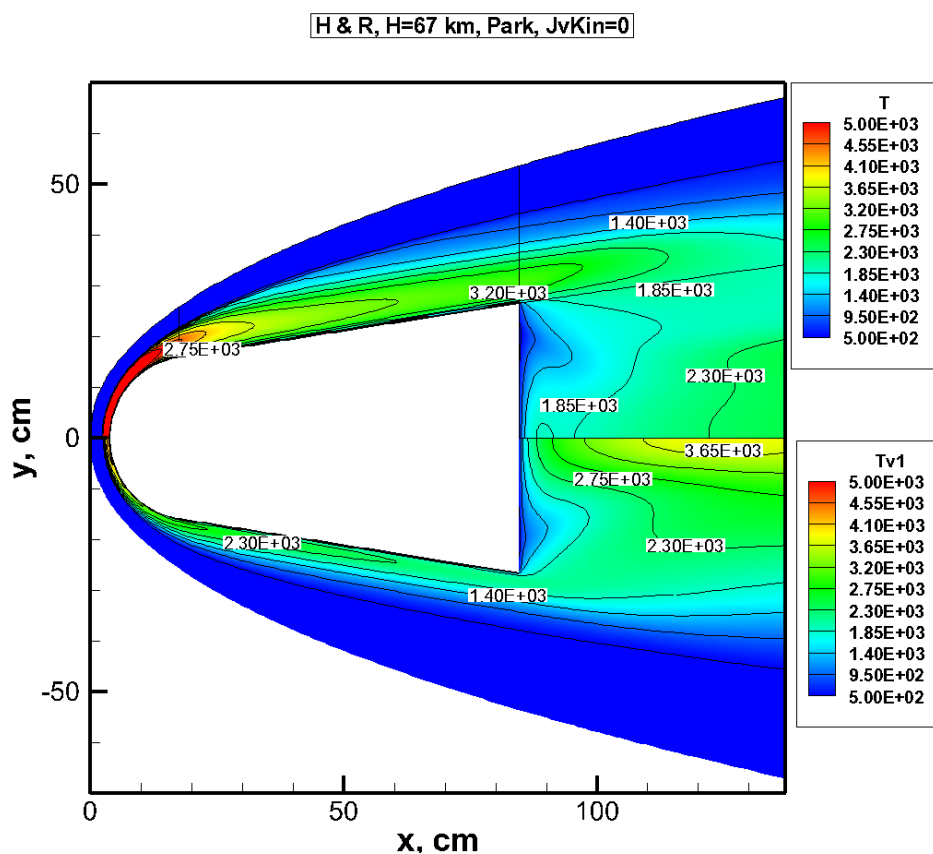


Рис. 33. Поступательная и колебательная температура N_2 на высоте $H=67$ км. Модель ЛТР

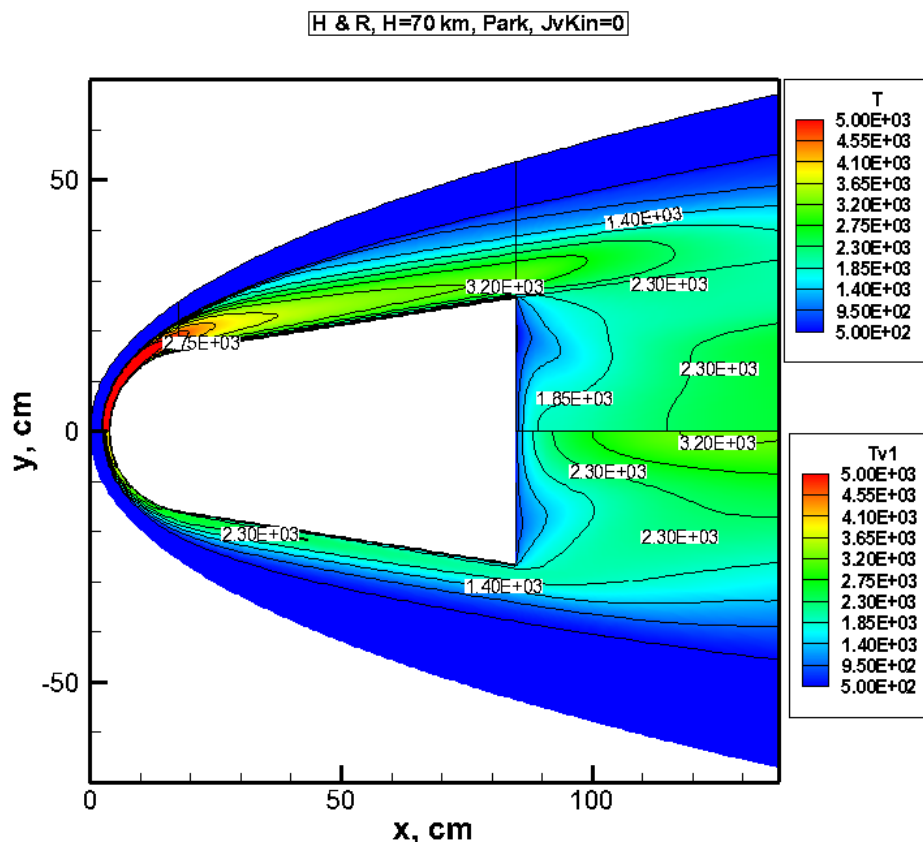


Рис. 34. Поступательная и колебательная температура N_2 на высоте $H = 70$ км. Модель ЛТР

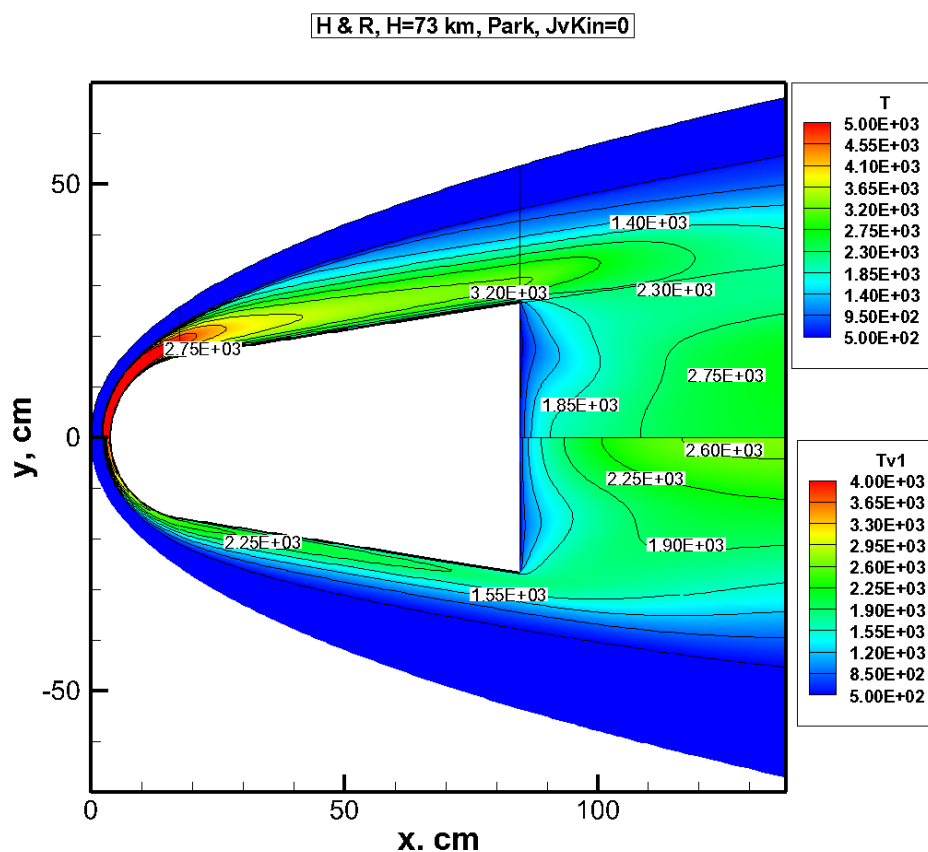


Рис. 35. Поступательная и колебательная температура N_2 на высоте $H = 73$ км. Модель ЛТР

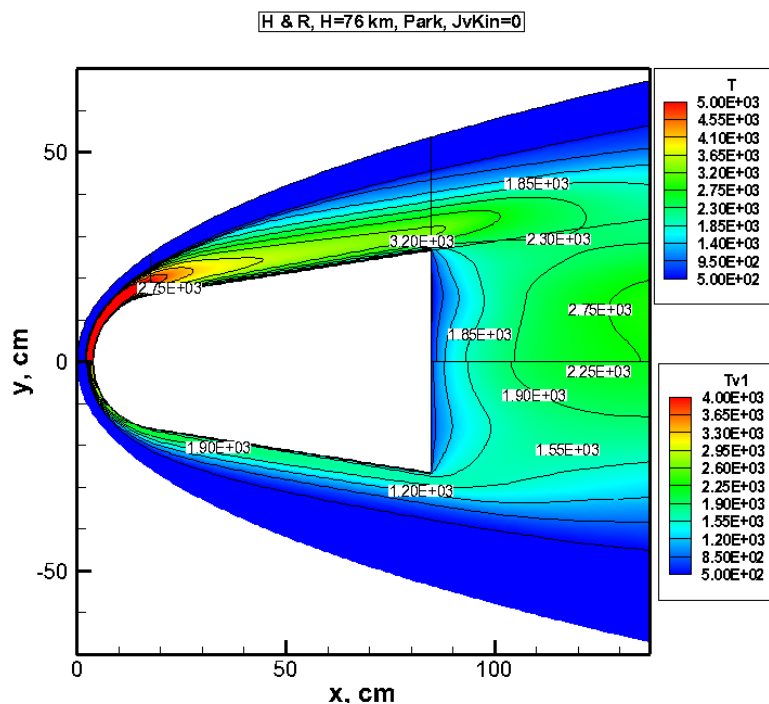


Рис. 36. Поступательная и колебательная температура N_2 на высоте $H = 76$ км. Модель ЛТР

Совместно с данными по радиальному распределению электронов в разных продольных сечениях (рис. 37–41) и соответствующих данных по радиальному распределению поступательной и колебательных температур N_2 (рис. 42–46) представленная совокупность расчетных данных позволяет получить достаточно полное представление о структуре течения частично ионизованного газа вблизи ГЛА на высотах $61 \div 76$ км.

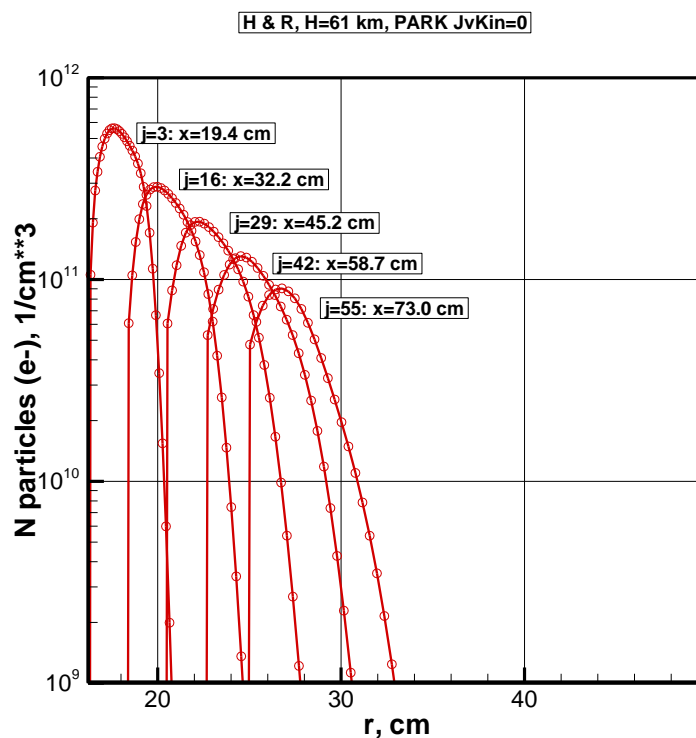


Рис. 37. Радиальные распределения электронов на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 61$ км. Модель ЛТР

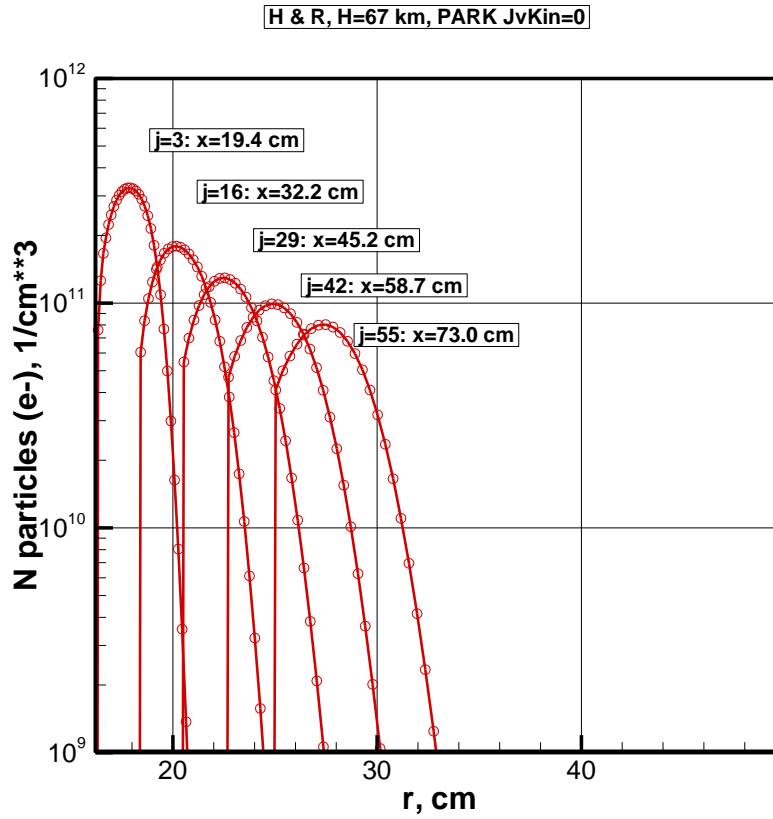


Рис. 38. Радиальные распределения электронов на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 67$ км. Модель ЛТР

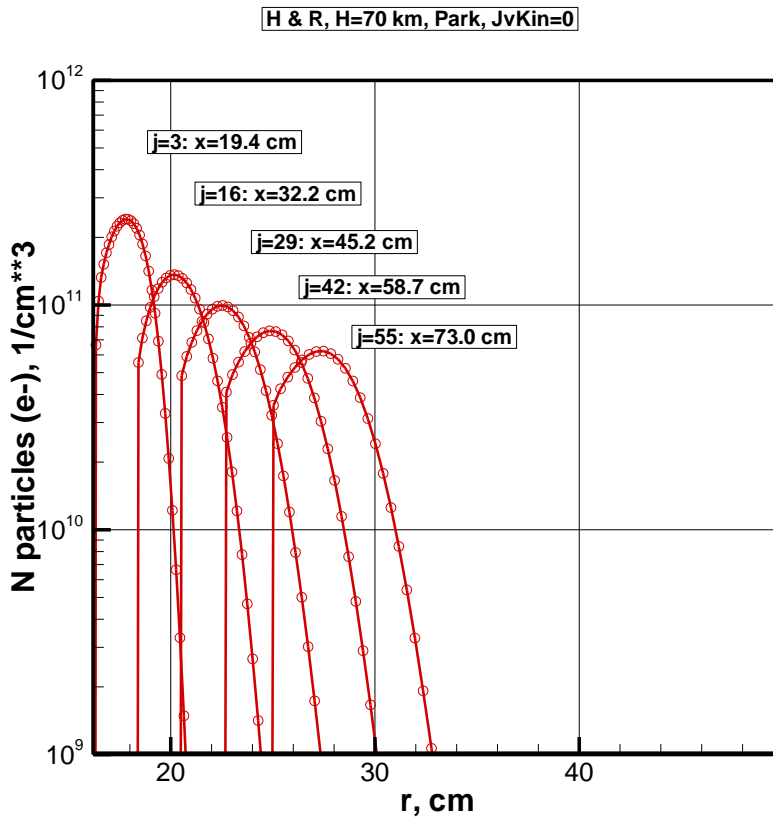


Рис. 39. Радиальные распределения электронов на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 70$ км. Модель ЛТР

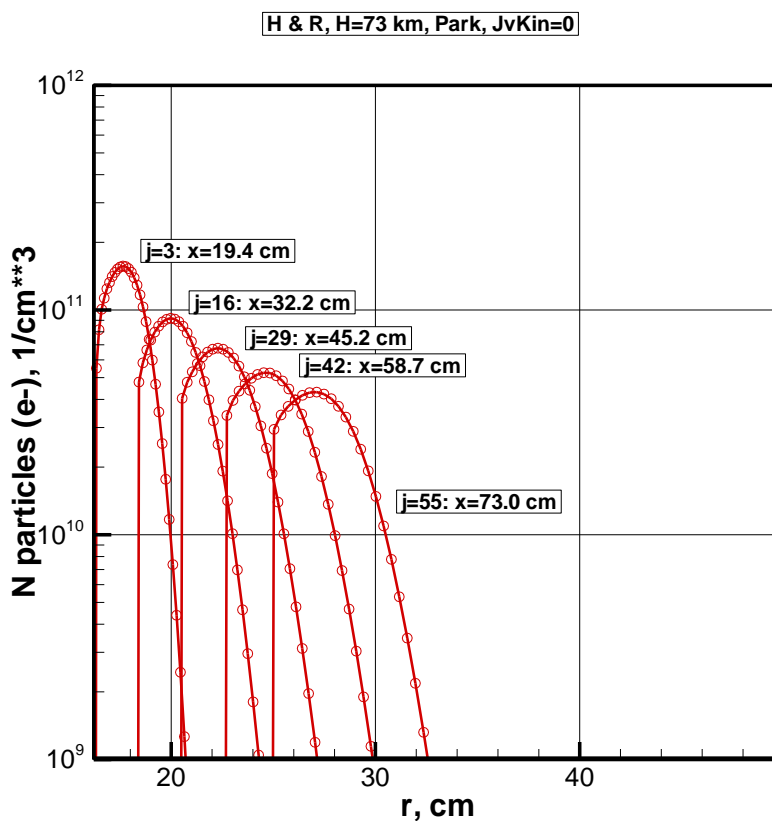


Рис. 40. Радиальные распределения электронов на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 73$ км. Модель ЛТР

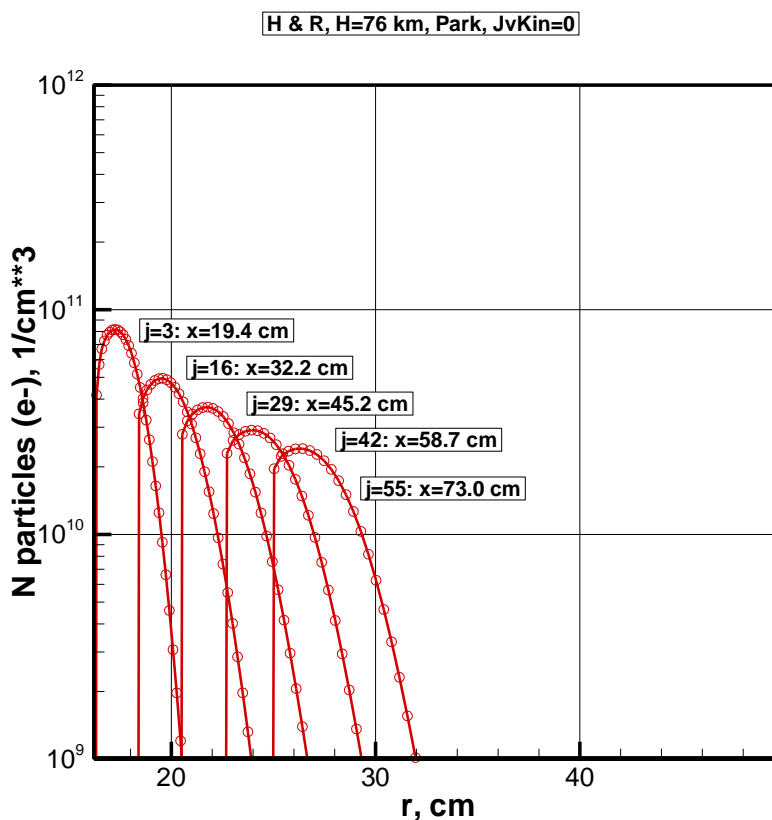


Рис. 41. Радиальные распределения электронов на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 76$ км. Модель ЛТР

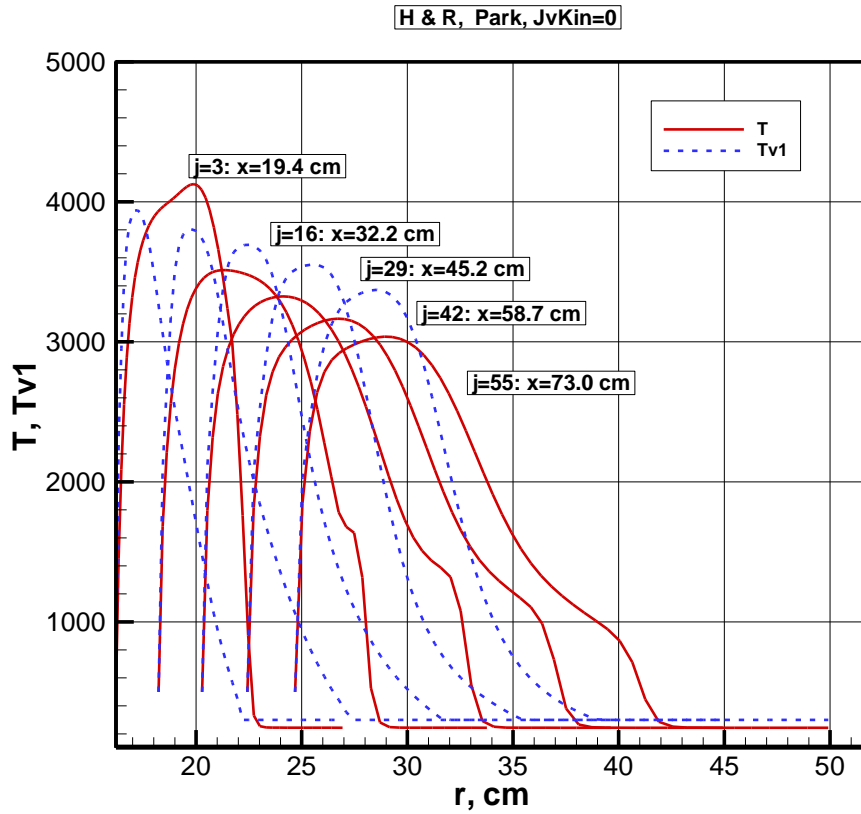


Рис. 42. Радиальные распределения поступательной и колебательной температуры N_2 на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 61$ км. Модель ЛТР

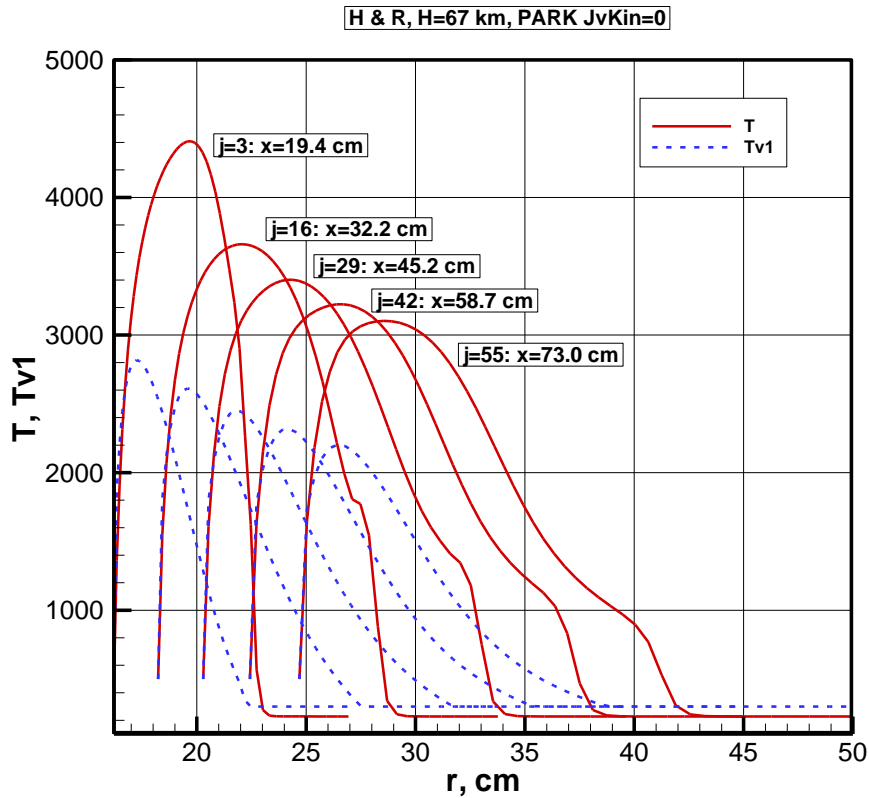


Рис. 43. Радиальные распределения поступательной и колебательной температуры N_2 на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 67$ км. Модель ЛТР

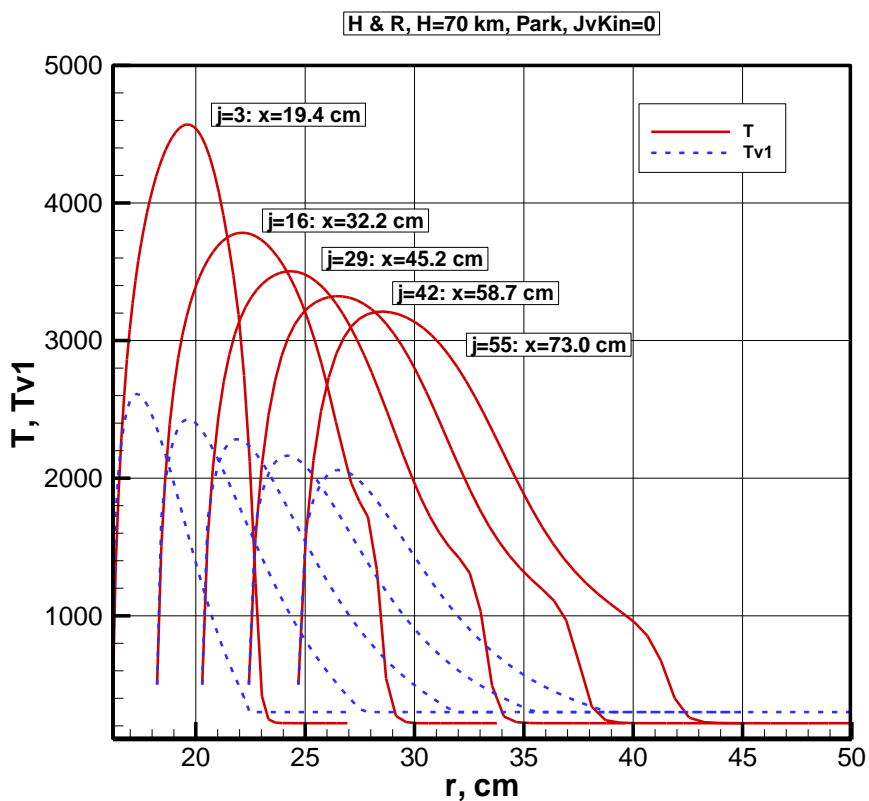


Рис. 44. Радиальные распределения поступательной и колебательной температуры N_2 на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 70$ км. Модель ЛТР

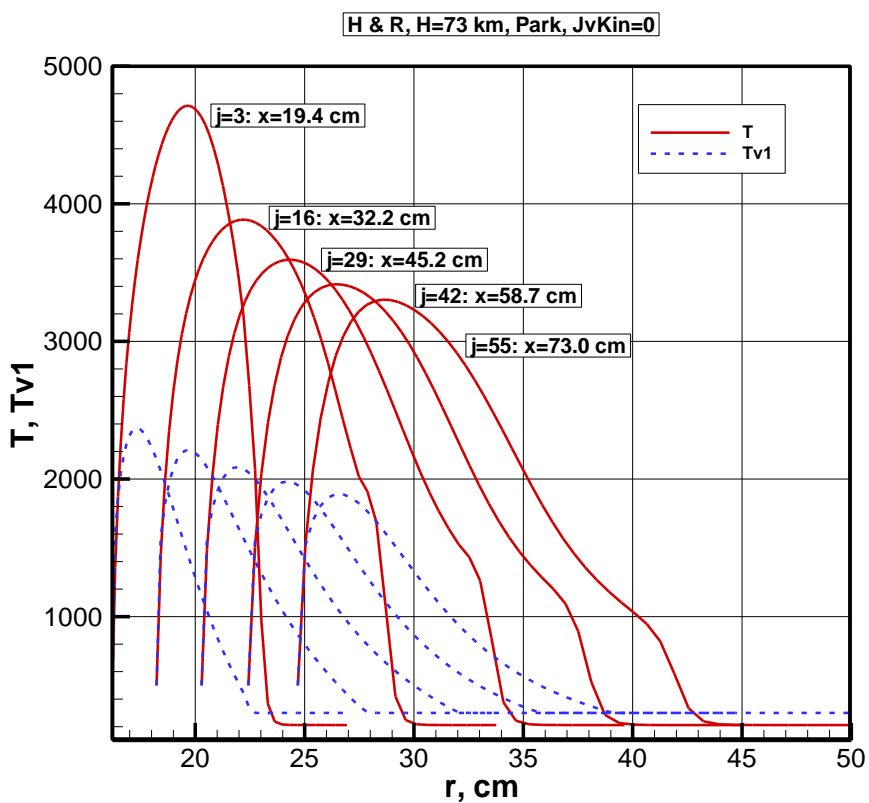


Рис. 45. Радиальные распределения поступательной и колебательной температуры N_2 на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 73$ км. Модель ЛТР

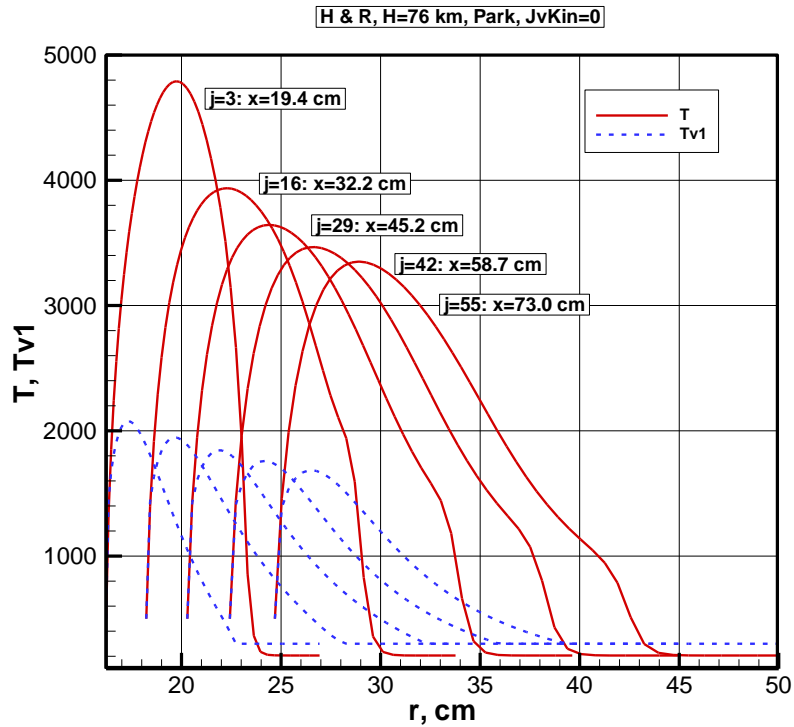


Рис. 46. Радиальные распределения поступательной и колебательной температуры N_2 на разных расстояниях от передней критической точки на высоте $H = 76$ км. Модель ЛТР

Температурные распределения вдоль задней критической линии тока (рис. 47–51) демонстрируют неравновесность течения в области ближнего следа. Подчеркнем, что модель сильно неравновесного течения в области ближнего следа требует дополнительного рассмотрения, включая вопросы и постановочного характера.

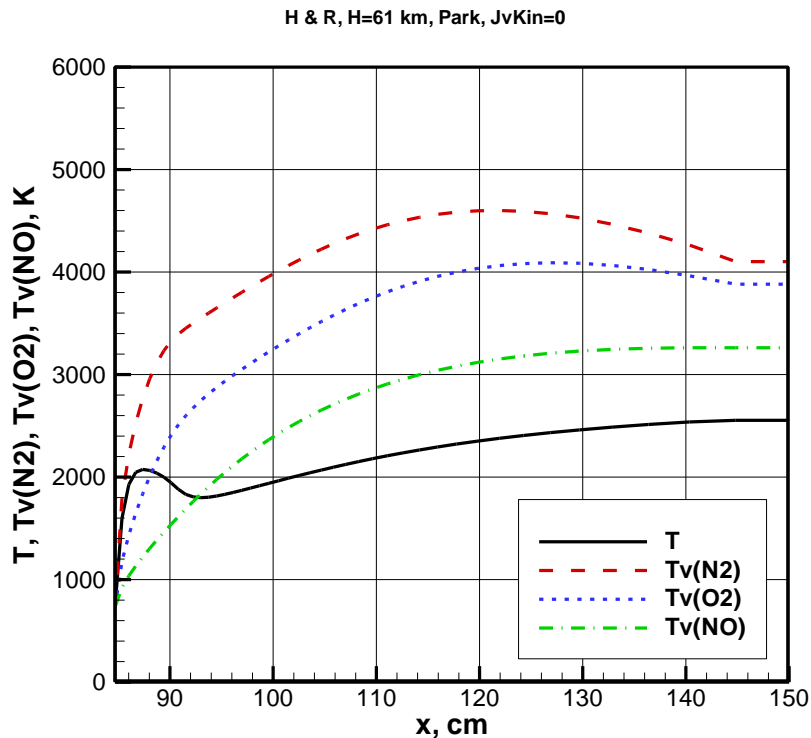


Рис. 47. Радиальные распределения поступательной и колебательных температур вдоль задней критической линии тока на высоте $H = 61$ км. Модель ЛТР

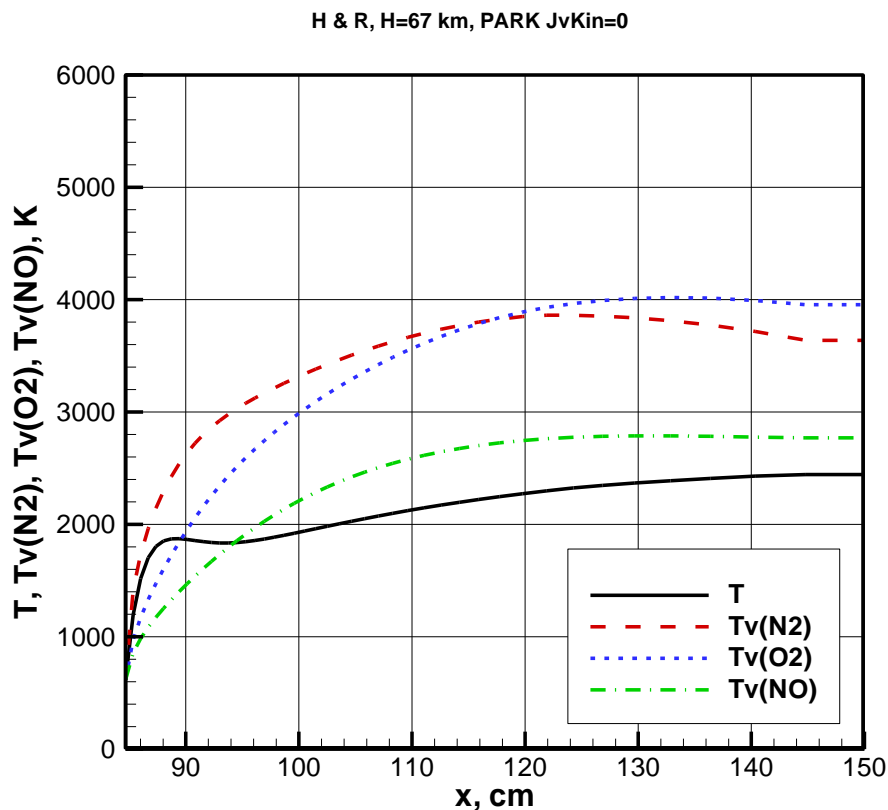


Рис. 48. Радиальные распределения поступательной и колебательных температур вдоль задней критической линии тока на высоте $H = 67$ км. Модель ЛТР

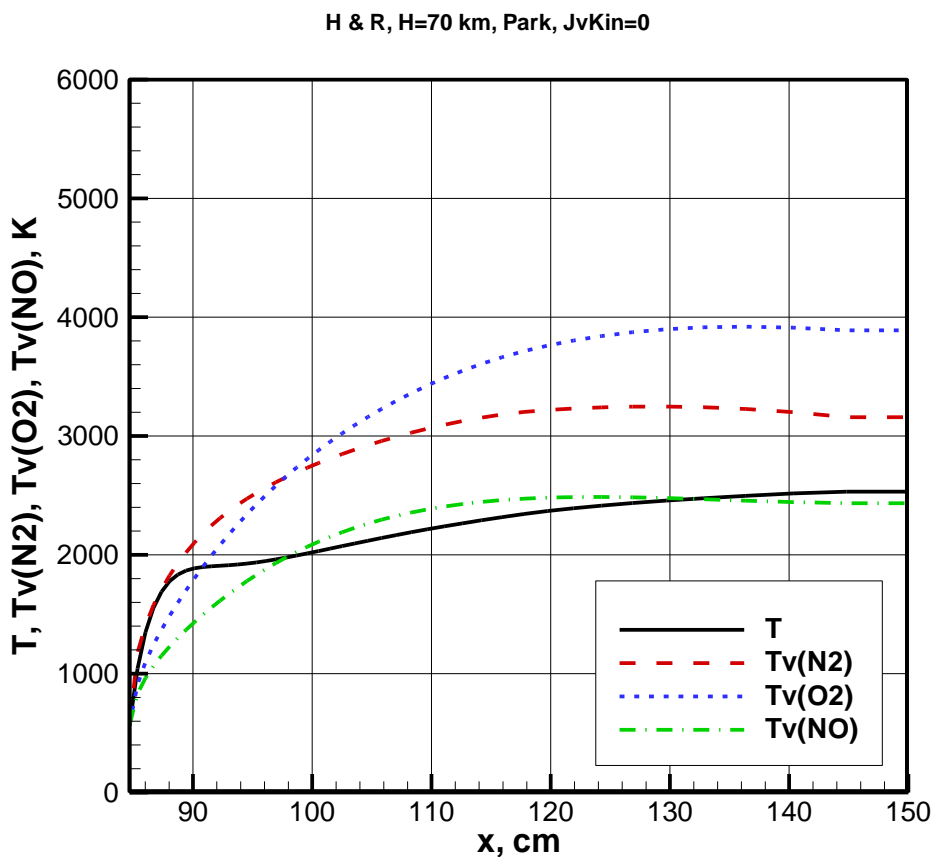


Рис. 49. Радиальные распределения поступательной и колебательных температур вдоль задней критической линии тока на высоте $H = 70$ км. Модель ЛТР

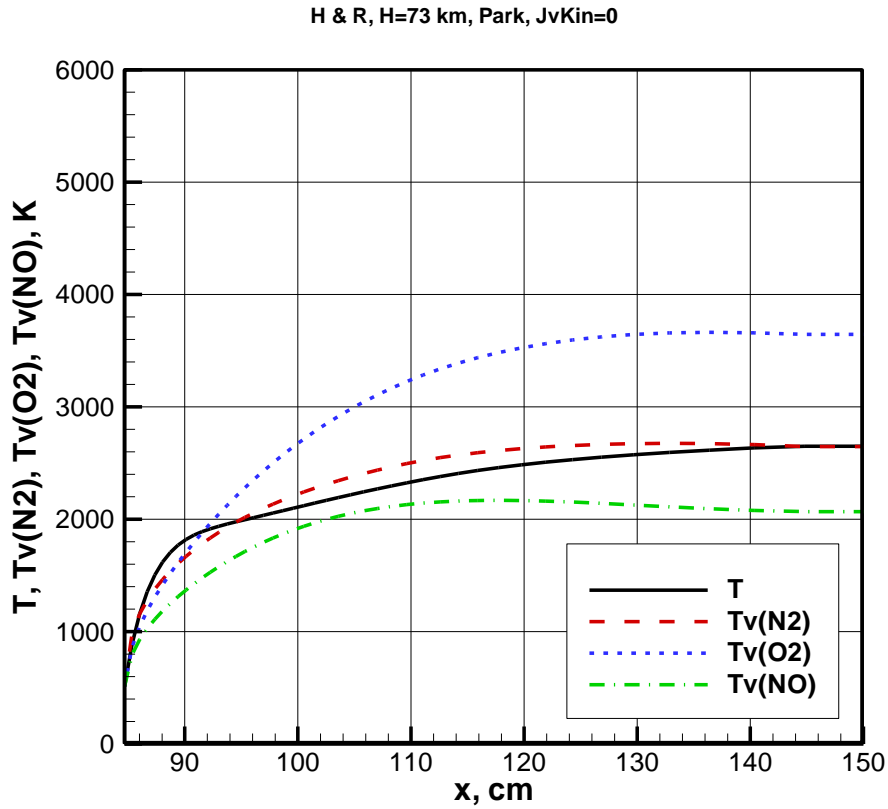


Рис. 50. Радиальные распределения поступательной и колебательных температур вдоль задней критической линии тока на высоте $H = 73$ км. Модель ЛТР

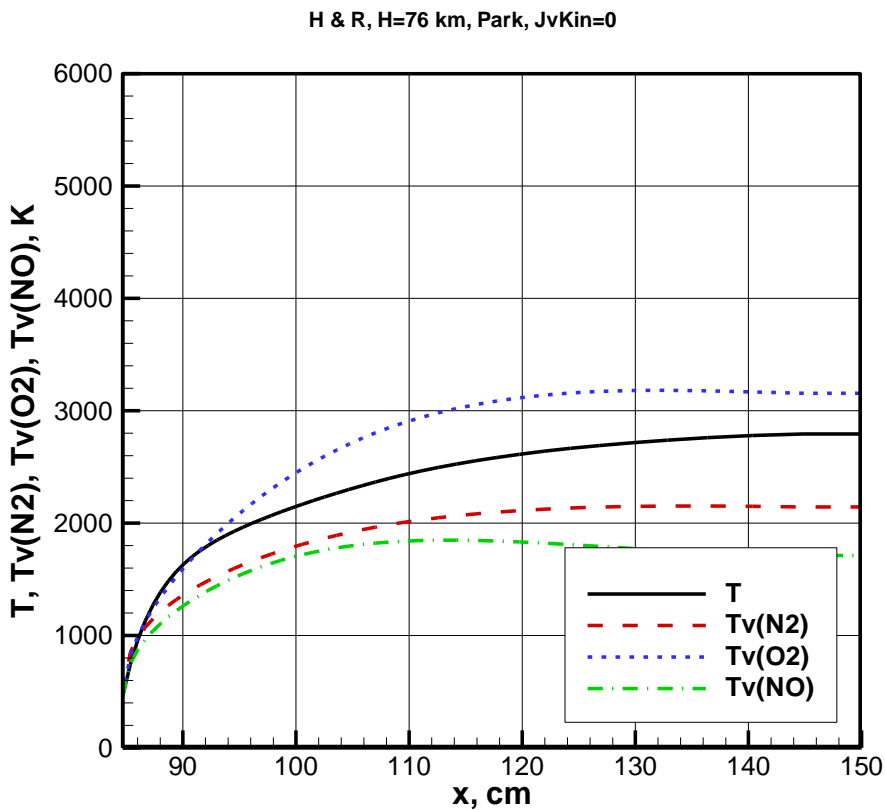


Рис. 51. Радиальные распределения поступательной и колебательных температур вдоль задней критической линии тока на высоте $H = 76$ км. Модель ЛТР

На рис. 52–56 представлены распределения плотностей конвективного теплового потока (и его составляющих: за счет теплопроводности и диффузии), вдоль образующей ГЛА. Демонстрируется закономерное падение плотности теплового потока от критической точки ($s=0$) вдоль образующей.

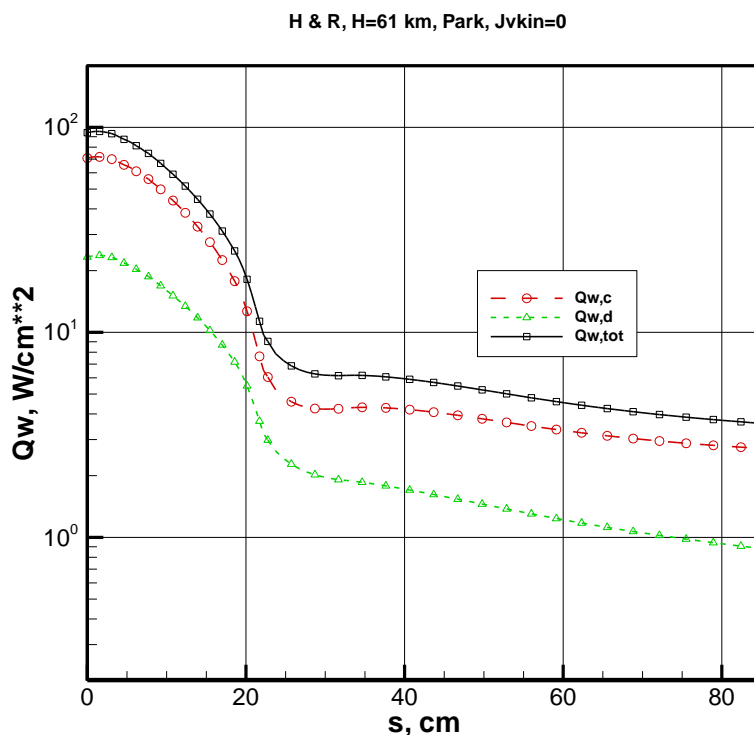


Рис. 52. Распределение плотности полного ($Q_{w,tot}$), теплопроводного ($Q_{w,c}$) и диффузионного ($Q_{w,d}$) конвективного теплового потока вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 61$ км. Модель ЛТР

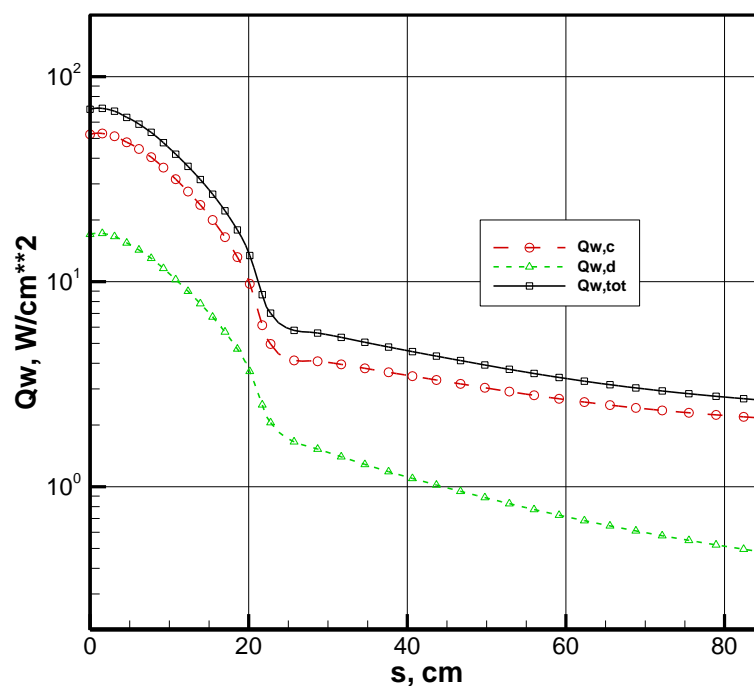


Рис. 53. Распределение плотности полного ($Q_{w,tot}$), теплопроводного ($Q_{w,c}$) и диффузионного ($Q_{w,d}$) конвективного теплового потока вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 67$ км. Модель ЛТР

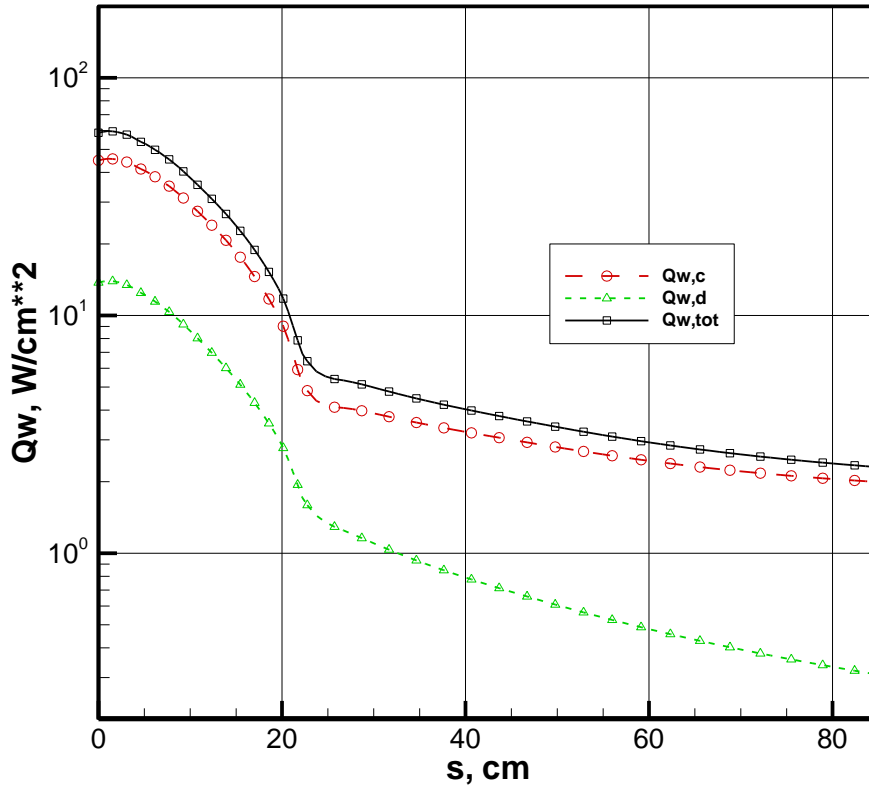


Рис. 54. Распределение плотности полного ($Q_{w,tot}$), теплопроводного ($Q_{w,c}$) и диффузионного ($Q_{w,d}$) конвективного теплового потока вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 70$ км. Модель ЛТР

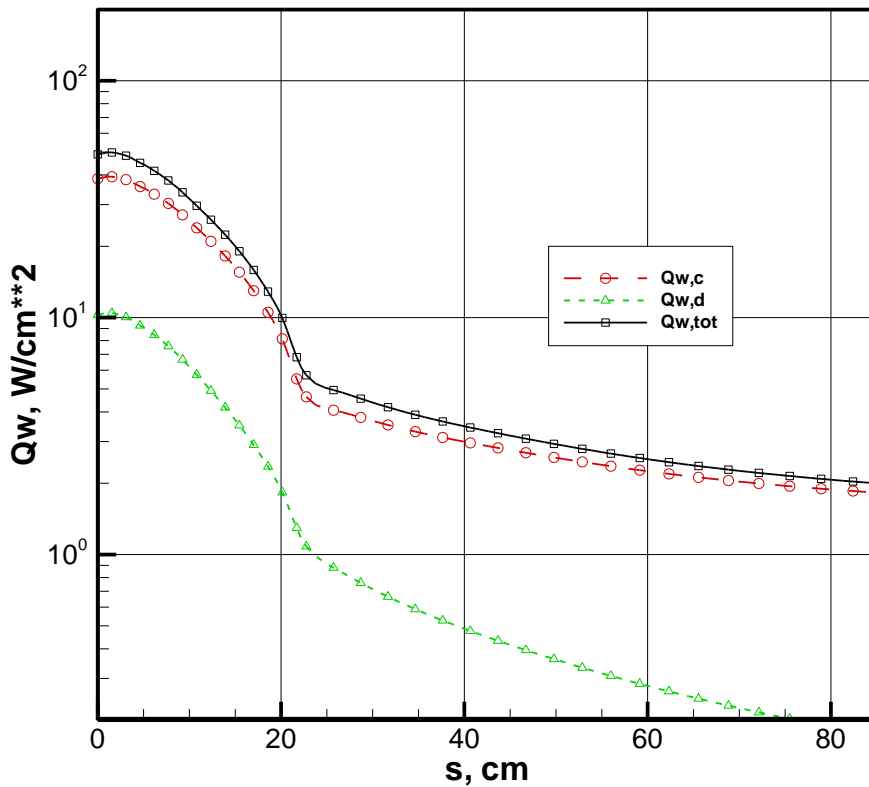


Рис. 55. Распределение плотности полного ($Q_{w,tot}$), теплопроводного ($Q_{w,c}$) и диффузионного ($Q_{w,d}$) конвективного теплового потока вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 73$ км. Модель ЛТР

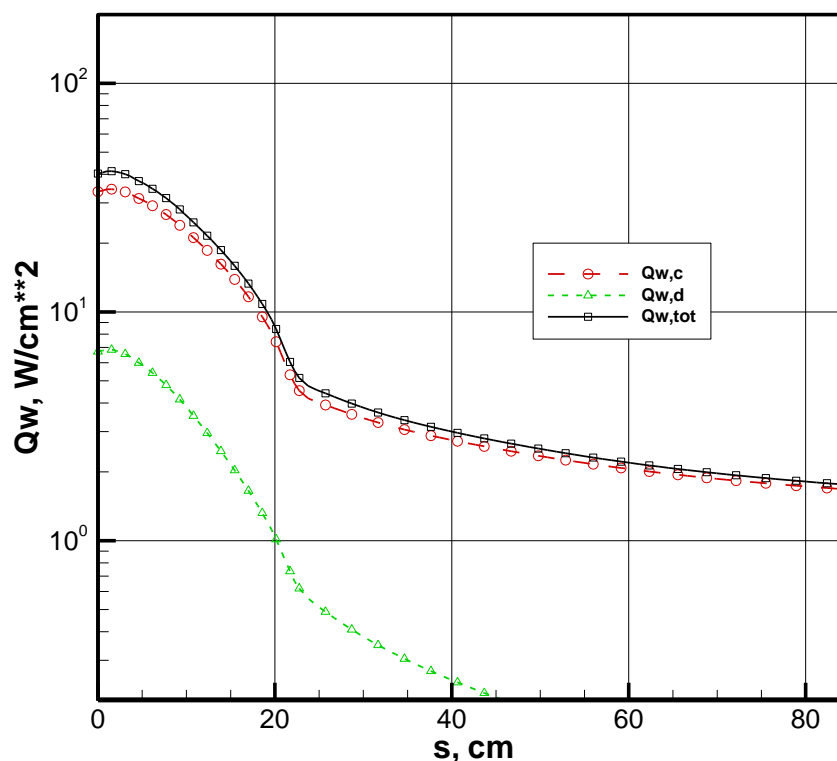


Рис. 56. Распределение плотности полного ($Q_{w,tot}$), теплопроводного ($Q_{w,c}$) и диффузионного ($Q_{w,d}$) конвективного теплового потока вдоль образующей затупленного по сфере конуса на высоте $H = 76$ км. Модель ЛТР

Из представленных данных наибольшая плотность теплового потока достигается на высоте 61 км и составляет $Q_w = 100 \text{ Вт/см}^2$.

3. Заключение

Выполнено численное исследование аэрофизики полета ГЛА на высотах $61 \div 76$ км со скоростью $V_\infty = 5.34$ км/с. Показано удовлетворительное согласие по электронным концентрациям у поверхности ГЛА с данными летного эксперимента.

Показано, что типичный уровень концентрации электронов составляет $10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-2}$, а плотность конвективного теплового потока к поверхности достигает величин $\sim 100 \text{ Вт/см}^2$.

Посредством численного моделирования продемонстрировано, что рассмотренные условия летного эксперимента являются термически неравновесными.

Отмечается необходимость построения модели неравновесной ассоциативной ионизации для ГЛА в диапазоне скоростей $5 \div 8$ км/с.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Российской академии наук и, частично, в рамках грантов РФФИ №13-01-00537 и 13-08-12033.

Список литературы

1. Hayes D., Rotman W. Microwave and Electrostatic Probe Measurements on a Blunt Body Re-Entry Vehicle // AIAA J. 1973. Vol. 11. No. 5. P. 675.
2. Суржиков С.Т. Радиационная газовая динамика спускаемых космических аппаратов. Много-температурные модели. М.: ИПМех РАН. 2013. 706 с.
3. Суржиков С.Т. Радиационный нагрев поверхности сверхорбитальных спускаемых космических аппаратов с учетом атомных линий // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 4. 48с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/235/>

4. Суржиков С.Т., Шувалов М.П. Анализ радиационно-конвективного нагрева четырех типов спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 4. 18с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/237/>
5. Суржиков С.Т. Релаксационная модель спектральной излучательной способности метеорных явлений // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13, вып. 3. 12с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-3/articles/364/>
6. Суржиков С.Т. Расчет обтекания модели космического аппарата MSRO с использованием кодов NERAT-2D и NERAT-3D // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. 8с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/122/>
7. Суржиков С.Т. Трехмерная вычислительная модель аэротермодинамики спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. 9с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/121/>
8. Суржиков С.Т. Ионизация сжатого слоя в летном эксперименте RAM-C-II // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. №1. С. 42–48.
9. Суржиков С.Т. Двумерный численный анализ ионизации потока в летном эксперименте RAM-C-II // Химическая физика. 2015. Т. 34, №2, С. 24–42
10. Суржиков С.Т. Пространственные эффекты ионизация сжатого слоя в летном эксперименте RAM-C-II // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460, № 6, С. 660–665
11. Akey N.D., Cross A.E. Radio Blackout Alleviation and Plasma Diagnostic Results from a 25000 Foot per Second Blunt Body Reentry. NASA TN D-5615. February, 1970.
12. Grantham W.L. Flight Results of 25000 Foot per Second Blunt Body Reentry Experiment Using Microwave Reflectometers to Measure Plasma Electron Density and Standoff Distance. NASA TN D-6062. December, 1970.
13. Jones W.L. Jr., Cross A.E. Electrostatic Probe Measurements of Plasma Parameters for Two Reentry Flight Experiments at 25000 Feet per Second. NASA TN D-6617. February, 1972.
14. Candler G.V., MacCormack R.W. Computation of Weakly Ionized Hypersonic Flows in Thermochemical Nonequilibrium // J. of Thermophysics. 1991. Vol.5. № 3. Pp. 266–273.
15. Treanor C.E., Marrone P.V. Effect of Dissociation on the Rate of Vibrational Relaxation // The Physics of Fluids. 1962. Vol.5. No. 9. Pp.1022–1026.
16. Marrone P.V., Treanor C.E. Chemical Relaxation with Preferential Dissociation from Excited Vibrational Levels // The Physics of Fluids. 1963. Vol. 6, No. 9. Pp. 1215–1221.
17. Park C. Review of Chemical Kinetic Problems of Future NASA Missions. I: Earth Entries // J. of Thermophysics and Heat Transfer. 1993. Т. 7. № 3. P. 385.

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2015 г.