

6. Ринкевичюс Б. С., Толкачев А. В. Оптический доплеровский измеритель скорости газовых потоков.—«Квант. электроника», 1974, т. 1, № 9.
7. Василенко Ю. Г., Донцова В. В., Дубинцев Ю. Н. Лазерный доплеровский измеритель скорости с применением интерферометра Фабри — Перо.—«Автоматрия», 1971, № 3.
8. Paul D. M., Jackson D. A. Measurement of supersonic velocity and turbulence by laser anemometry.—«J. Phys. E: Scientific Instrum.», 1971, vol. 4, p. 173.
9. Morse H., Tillis V., Seifert H., Babcock W. Development of laser-doppler particle sensor for the measurement of velocities in rocket exhausts.—«J. Spacecraft and rockets», 1969, vol. 6, N 3, p. 1168.
10. Хирд Р. Измерение лазерных параметров. М., «Мир», 1970.
11. Ринкевичюс Б. С. Доплеровский метод измерения локальных скоростей с помощью лазеров.— УФН, 1973, т. 111, вып. 2, с. 305.
12. Алхимов А. П., Папырин А. Н., Предеин А. Л., Солоухин Р. И. Экспериментальное исследование эффекта скоростного запаздывания мелких частиц в сверхзвуковом потоке газа.— ПМТФ, 1977, № 4.

УДК 533.6.011.8

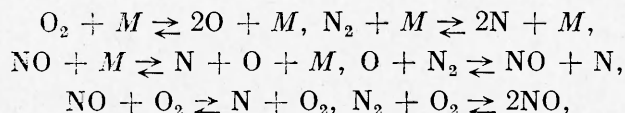
О РОЛИ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В СОПЛАХ

В. Н. Комаров
(Жуковский)

Как известно, в потоке высокоэнтропийного воздуха в соплах наряду с химическими реакциями происходит неравновесное возбуждение колебательных степеней свободы. Роль колебательной неравновесности изучена недостаточно, и при расчетах, как правило, считается, что колебательные степени свободы возбуждены равновесно [1—4].

В данной работе рассматривается неравновесное течение воздуха в соплах гиперболического профиля для диапазона температур и давлений торможения $3000 \leq T'_0 \leq 5000\text{K}$, $1 \leq p'_0 \leq 100$ атм, характерного для существующих гиперзвуковых экспериментальных установок. На основании проведенных расчетов анализируется зависимость величины замороженной внутренней энергии от режима течения. Делаются выводы о влиянии колебательной релаксации на газодинамические параметры потока.

Газокинетическая модель. Для воздуха в рассматриваемом диапазоне температур и давлений основной считается система химических реакций [4]:



где M — любая из частиц O_2 , N_2 , O , NO , N .

Считается, что колебательная температура окиси азота находится в равновесии с поступательной температурой. Для расчета колебательной энергии молекул N_2 и O_2 использовались кинетические уравнения работы [3], описывающие колебательную релаксацию в смеси многоатомных газов *. Система одномерных газодинамических уравнений подробно опи-

* Как показывают расчеты, в рассматриваемом случае влияние диссоциации на возбуждение колебательных степеней свободы молекул незначительно.

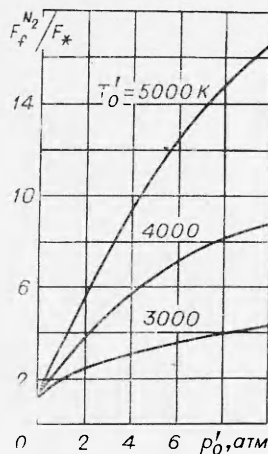
сана в работах [4—5]. Выражения для времен колебательной релаксации и констант скоростей реакций взяты из работ [6—8].

Расчеты проводились для осесимметричных гиперболических сопел, площадь поперечного сечения которых F' описывается уравнением $F'/F_* = 1 + (x'/l)^2$, где $l' = r_*'/\operatorname{tg} \varphi'$ (φ' — полуугол асимптотического конуса, x' — координата вдоль оси сопла, $F_*' = \pi r_*'^2$, r_*' — радиус минимального сечения сопла, штрих — размерная физическая величина). В дозвуковой части сопла $l' = 0,262$ см ($\varphi'_1 = 45^\circ$, $r_*' = 0,262$ см), в сверхзвуковой части $l' = 1$ см. Метод расчета подробно изложен в работах [5, 9, 10].

Результаты расчета. Замороженная удельная внутренняя энергия потока $w'_f = e'_f + h'_f$, где e'_f — замороженная удельная колебательная энергия; h'_f — замороженная удельная энергия, обусловленная диссоциацией.

Проведенные расчеты показали, что для рассмотренных режимов течения основной вклад в замороженную колебательную энергию e'_f вносят молекулы N_2 , поскольку величина замороженной концентрации N_2 значительно больше величин замороженных концентраций O_2 и NO . Энергетический вклад молекул NO в e'_f незначителен. Энергетический вклад молекул O_2 составляет примерно 10% от полной замороженной колебательной энергии.

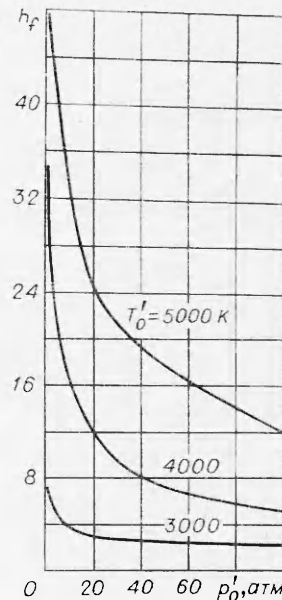
На фиг. 1 приведены зависимости величины сечения $F_f^{N_2}/F_*$, в котором замораживается концентрация и колебательная энергия молекул N_2 ,



Ф и г. 1

от давления торможения p'_0 при некоторых значениях температуры торможения T'_0 . Сечение замораживания внутренней энергии молекул N_2 формально соответствует значению колебательной энергии N_2 , отличающемуся от своего замороженного значения на 1%.

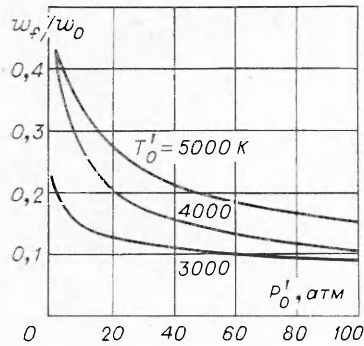
Замораживание концентраций компонентов воздуха за исключением концентрации атомов азота, которая пренебрежимо мала для рассматриваемого диапазона параметров торможения, происходит раньше замораживания колебаний N_2 и значительно раньше замораживания колебаний O_2 . На фиг. 2 представ-



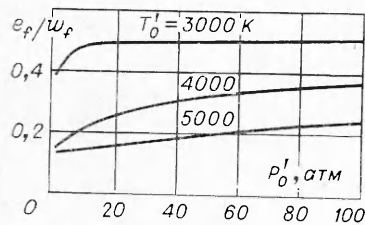
Ф и г. 2

лены зависимости безразмерной замороженной химической энергии $h_f = h'_f/R'T'_\infty$ (R' — универсальная газовая постоянная, $T'_\infty = 273\text{K}$) от p'_0 для некоторых значений T'_0 .

Зависимость отношения w_f/w_0 замороженной внутренней энергии к полной энергии потока от давления торможения для различных T'_0 приведена на фиг. 3. При $4000 \leq T'_0 \leq 5000\text{K}$ и $p'_0 = 1\text{ атм}$ замороженная энергия может составлять более 40% от полной энергии потока.



Ф и г. 3



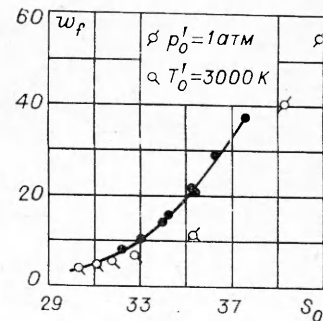
Ф и г. 4

На фиг. 4 отражен вклад замороженной колебательной энергии в полную замороженную энергию потока в зависимости от параметров торможения. С ростом давления колебательная релаксация начинает играть все более существенную роль, и при $T'_0 = 3000\text{K}$ вклад колебаний в замороженную энергию потока сравним со вкладом химических реакций. С увеличением температуры роль колебаний становится все менее существенной и при $T'_0 = 5000\text{K}$ и произвольном p'_0 из рассматриваемого диапазона давлений величина замороженной колебательной энергии составляет менее 25% от величины замороженной внутренней энергии неравновесного воздуха. Это связано с тем, что в химически релаксирующем потоке начинают возрастать концентрации атомарных компонентов и соответственно убывать концентрации молекул.

Замечание об энтропийной корреляции. Так называемая энтропийная корреляция представляет зависимость замороженных параметров потока воздуха от энтропии в форкамере [1, 11]. Она является весьма удобной для количественного определения концентраций и газодинамических параметров неравновесного потока воздуха в соплах. Энтропийная корреляция химически замороженной энергии и концентраций нейтральных компонентов воздуха на основании анализа расчетных данных ряда авторов приведена в работе [12] для широкого диапазона параметров торможения $4000 \leq T'_0 \leq 15000\text{K}$ и $10 \leq p'_0 \leq 8957\text{ атм}$ для параметра $l' = 1\text{ см}$ ($\varphi_1 = \varphi_2$).

Представляет интерес указать область применения энтропийной корреляции. На фиг. 5 построена полученная в данной работе зависимость безразмерной замороженной внутренней энергии $w_f = w'_f/R'T'_\infty$ от энтропии S_0 в форкамере ($S_0 = S'_0\mu_\infty/R'$, где $\mu_\infty = 29\text{ г/моль}$).

Корреляция вполне удовлетворительна для значений S'_0 , соответствующих параметрам торможения $p'_0 \geq 10\text{ атм}$ и $T'_0 \geq 4000\text{K}$. В области меньших значений S'_0 ограничение на p'_0 становится все более жестким с уменьшением T'_0 . В частности, при $T'_0 = 3000\text{ K}$ энтропийная



Ф и г. 5

корреляция справедлива для $p_0 \geq 25$ атм. Уточнение кинетической модели воздуха в области низких давлений торможения, возможно, позволит расширить область применения энтропийной корреляции.

Поступила 10 III 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Агафонов В. П., Вертушкин В. К., Гладков А. А., Полянский О. Ю. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. М., «Машиностроение», 1972.
2. Лунев В. В. Гиперзвуковая аэродинамика. М., «Машиностроение», 1975.
3. Ступоченко Е. В., Лосев С. А., Осипов А. П. Релаксационные процессы в ударных волнах. М., «Наука», 1965.
4. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
5. Бударина М. Ф., Комаров В. Н., Саяпин Г. Н. Расчет неравновесных течений воздуха в соплах.—«Труды ЦАГИ», 1975, вып. 1701.
6. Мартин Д. Вход в атмосферу. М., «Мир», 1969.
7. Гордиец Б.Ф., Мамедов И. С., Осипов А. П., Шеленин Л. А. О распределении колебательной энергии в газовых смесях. Препринт ФИАН СССР № 31, М., 1972.
8. Gilmore F. R., Bauer E., Mc Gowan J. W. A review of atomic and molecular excitation mechanisms in nonequilibrium gases up to 20 000 K.—«J. Quant. Spectr. and Radiat. Transfer», 1969, vol. 9.
9. Эшенредер А. и др. Неравновесное расширение воздуха при наличии химических реакций.—«Вопросы ракетн. техники», 1963, № 2.
10. Стулов В. П., Шкадова В. П. Об одномерном неравновесном течении воздуха.—«Изв. АН СССР. МЖГ», 1968, № 2.
11. Bray K. N. C. Simplified sudden-freezing analysis for nonequilibrium nozzle flows.—«ARS J.», 1961, vol. 31, N 6.
12. Harris C. J. Comment on nonequilibrium effects on high-enthalpy expansion of air.—«AIAA J.», 1966, vol. 4, N 6.

УДК 533.6.011 : 532.72

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ В ГОРЛЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО СЛЕДА

Л. И. Скурин, А. В. Юрков

(Ленинград)

1. При движении затупленного тела с большой гиперзвуковой скоростью возмущенная область представляет собой смесь газов, образованных в результате физико-химических превращений. Строгий расчет в этих условиях такой сложной области, как ближний след, представляет существенные трудности.

Ближний след представляет собой сравнительно короткую область, где происходят резкие изменения направлений линий тока газа в условиях существенного влияния вязкости. Поэтому предполагается, что на распределения давления, среднemasсовой скорости и теплосодержания доминирующее влияние оказывают динамические и тепловые эффекты без учета эффектов химических превращений, и проводится расчет ближнего следа в два этапа. На первом этапе рассчитываются распределения давления, скорости и теплосодержания в ближнем следе при замене истинного