

УДК 533.6.011.541.12

**ВЛИЯНИЕ ПАРОВ ВОДЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛЕДА**

**ПИЛЮГИН Н. Н., ТИХОМИРОВ С. Г.**

При экспериментальном исследовании явлений, протекающих в потоке воздуха около моделей, летящих в аэробаллистической трассе с гиперзвуковыми скоростями, возникает вопрос о влиянии паров воды в трассе на измерения параметров газа, например на электронную концентрацию или на интенсивность излучения. Пары воды обычно присутствуют в атмосферном воздухе и без принятия специальных мер по их устранению могут повлиять на результаты измерений. В [1] теоретически исследовалось влияние химических реакций с участием паров воды в воздухе только на хемилюминесцентное излучение в следе. В частности, не рассматривалось влияние паров воды на электронную концентрацию.

В данной работе приведены результаты расчетов распределений неравновесных параметров в следе с учетом протекания химических реакций в воздухе и парах воды при условиях, характерных для аэробаллистических экспериментов [1-3].

1. Рассматривается решение уравнений осесимметричного турбулентного пограничного слоя, описывающих течение химически неравновесного многокомпонентного газа в дальнем следе за телом, летящим с гиперзвуковой скоростью. Общая постановка задачи и необходимые математические преобразования подробно изложены в [4-6]. Там же приведены результаты исследований, касающиеся численной реализации этого метода, и примеры расчетов в чистом воздухе. В соответствии с [4-6] задача сводится к решению следующей системы уравнений на оси следа:

$$\frac{d\psi_i}{dx} + \frac{2}{3} \frac{\psi_i}{x} = \frac{W_i}{\rho}, \quad i=1, 2, \dots, N_k, \quad N_k=N-N_1$$

$$x=x_H, \quad \psi_i=\psi_{iH} \tag{1.1}$$

где  $\psi_i = \gamma_{i0} - \gamma_{i\infty}$ ,  $\gamma_{i0}$  — мольно-массовая концентрация  $i$ -го компонента на оси следа,  $N$  — число компонентов,  $N_1$  — число химических элементов,  $W_i$  — скорость образования  $i$ -го компонента вдоль оси следа,  $\rho$  — плотность газа, индексы  $H$  и  $0$  отмечают параметры в начальном сечении и на оси следа соответственно,  $x$  — осевая координата,  $d$  — диаметр мишени тела.

Концентрации остальных  $N_1$  компонентов определяются из соотношений для концентраций химических элементов  $\gamma_j^*$  ( $j=1, 2, \dots, N_1$ ). Распределение температуры  $T$  на оси следа определяется с помощью соотношения для энтальпии  $h$

$$h(x) = \sum_{i=1}^N \left( \int_0^T c_{pi} dT + h_i^0 \right) \gamma_i \tag{1.2}$$

где удельная теплоемкость  $c_{pi}$  и энтальпия образования  $h_i^0$   $i$ -го компонента — известные функции температуры. Плотность находится из уравнения состояния. Функции  $h(x)$  и  $\gamma_j^*(x)$  найдены с помощью интегральных соотношений, следующих из уравнений импульса, энергии и диффузии элементов [4]. Для решения поставленной задачи использована двухточечная неявная конечно-разностная схема, содержащая весовой множи-

<i>j</i>	Реакция	<i>a<sub>f</sub></i>	<i>n<sub>f</sub></i>	<i>l<sub>f</sub></i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>a<sub>b</sub></i>	<i>n<sub>b</sub></i>	<i>l<sub>b</sub></i>	<i>c<sub>b</sub></i>	Литература
1	H <sub>2</sub> + M = H + H + M (M = O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> )	2,86	18	-1	51958	4	18	-1	0	[9, 10]
2	H <sub>2</sub> + O = H + H + O	7,15	18	-1	51958	1	19	-1	0	[9, 10]
3	H <sub>2</sub> O + M = OH + H + M (M = O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> )	1,4	22	-1,31	59400	4,6	21	-1,5	0	[9, 10]
4	OH + M = O + H + M (M = O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> )	1,4	14	0,21	50978	6	14	0	0	[9, 10]
5	OH + O = O + H + O	3,5	14	0,21	50978	1,5	15	0	0	[9, 10]
6	H + O <sub>2</sub> = OH + O	2,2	14	0	8450	3	13	0	604	[11, 13]
7	H <sub>2</sub> O + O = OH + OH	1,63	14	0	9160	6,02	12	0	550	[13, 15]
8	OH + O <sub>2</sub> = H + O <sub>2</sub>	-	-	-	-	9	11	0,5	0	[18]
9	OH + NO = H + NO <sub>2</sub>	1	14	0	599	5,37	14	0	871	[14]
10	H + H <sub>2</sub> O = H <sub>2</sub> + OH	9	13	0	10250	2,17	13	0	2590	[11, 15]
11	O + H <sub>2</sub> = OH + H	1,8	10	1	4480	8,3	9	1	3500	[11, 15]
12	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> = H + HO <sub>2</sub>	5,5	13	0	29100	2,53	13	0	350	[11, 16]
13	HO <sub>2</sub> + M = H + O <sub>2</sub> + M (M = O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> )	2,1	15	0	23000	7,53	15	0	-290	[15]
14	OH + OH = H + HO <sub>2</sub>	1,7	14	0	1000	2,53	14	0	950	[11, 19]
15	O <sub>2</sub> + OH = O + HO <sub>2</sub>	2,29	12	0	1250	4,8	13	0	500	[17, 18]
16	O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = OH + HO <sub>2</sub>	9,9	13	0	35833	5	13	0	500	[12, 17]
17	H <sub>2</sub> O + O = H + HO <sub>2</sub>	5,28	11	0	27378	5	13	0	500	[12, 17]
18	HO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = OH + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2,8	13	0	16500	1	13	0	910	[15, 16]
19	H <sub>2</sub> O + OH = H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H	6,4	11	0	36537	7,05	12	0	2114	[12]
20	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + M = OH + OH + M (M = O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> )	1,17	17	0	22900	8,4	14	0	-2667	[14]
21	O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = O + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4,77	13	0	46000	9	10	0	2000	[18, 20]
22	H <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub> = H + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	7,3	11	0	9400	1,7	12	0	1900	[15, 16]
23	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> = HO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub>	3,67	14	0	21037	1,8	13	0	500	[15, 12]
24	HO <sub>2</sub> + OH = O + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2,89	12	0	10267	2,8	13	0	3221	[12]
25	H <sub>2</sub> O + H = H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + e	9,9	7	1,54	73723	4,56	22	-1,6	0	[10, 13]
26	H + H + OH = H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + e	3,2	7	-0,65	14323	1,2	17	0	0	[10]
27	OH <sup>-</sup> + O <sub>2</sub> = OH + e + O <sub>2</sub>	4	11	1	20660	5	19	-0,5	0	[10]
28	OH <sup>-</sup> + N <sub>2</sub> = OH + e + N <sub>2</sub>	1,6	10	1	20660	2	18	-0,5	0	[10]

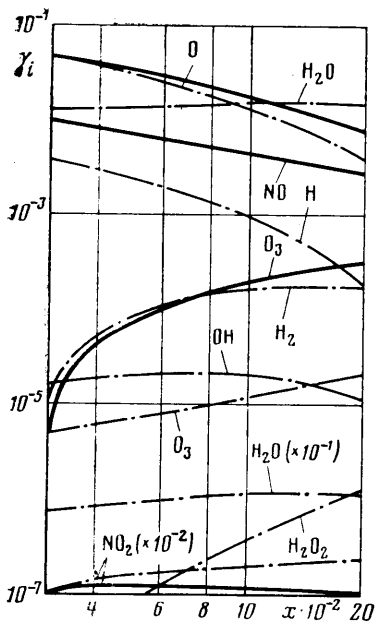
тель, значение которого выбрано таким образом, чтобы порядок точности схемы был близок ко второму [7, 8]. Переменный шаг интегрирования выбирался в процессе счета в зависимости от параметров задачи. На каждом шаге по *x* система разностных уравнений решалась с помощью итераций по методу Ньютона.

Для определения начальных значений концентраций химических компонентов при  $x_H=300$  использовались экспериментальные данные и результаты расчетов по методу трубок тока при заданном распределении давления.

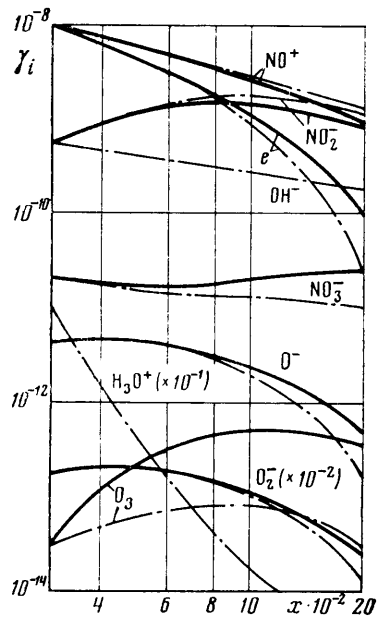
2. Модель химической кинетики в дальнейшем следе учитывала 22 компонента: O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O, N, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, O<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sup>+</sup>, e, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, OH, H, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HO<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, между которыми протекала 91 реакция. Список реакций между компонентами сухого воздуха и константы скоростей этих реакций приведены в [5, 6]. Реакции с участием водородосодержащих компонентов приведены в таблице. В этой же таблице приведены значения констант скоростей реакций, представленные в виде

$$k_j = a_j 10^{n_j} T^{l_j} \exp\left(-\frac{c_j}{T}\right), \quad [k_j] = (\text{см}^3/\text{моль})^{n_j-1} \cdot \text{с}^{-1}$$

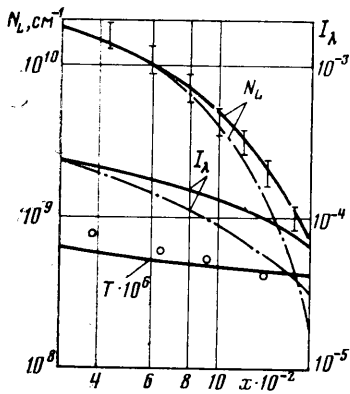
где температура дана в градусах Кельвина,  $q_j$  — порядок *j*-й реакции,  $a_j$ ;  $l_j$ ;  $n_j$ ;  $c_j$  — константы. Индексы *f* и *b* отмечают прямую и обратную реакции соответственно. Проведем оценки влажности воздуха для аэробаллистического эксперимента, пользуясь справочными данными [20]. Абсолютная влажность атмосферного воздуха *a* при  $p=760$  торр и температуре  $t=20^\circ\text{C}$  в экспериментальном помещении составляет 17,3 г/м<sup>3</sup> [20], относительная влажность по показаниям психометра  $r=70\%$ . Упругость *e*



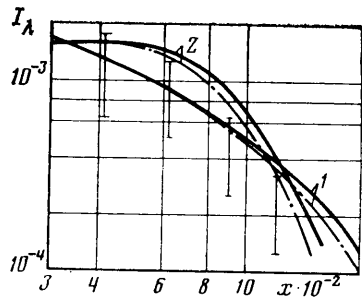
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

(или парциальное давление в мм рт.ст.) водяного пара находится из соотношения  $e = aTr/289,4$ , где  $T$  — абсолютная температура. Расчет по этой формуле для указанных выше условий дает  $e = 12,26$  торр. Тогда молярная концентрация водяных паров в воздухе составляет  $\xi_{H_2O} = 0,016$ .

В том случае, когда баротрасса вначале продолжительно откачивается до давления  $\sim 10^{-2}$  торр, а затем заполняется воздухом из атмосферы до давления  $p_\infty = 40$  торр, в трассе находится насыщенный пар, термическое состояние которого определяется одним параметром — температурой. В этом случае молярная концентрация водяных паров будет такой же, как и в атмосфере при той же температуре, т. е.  $\xi_{H_2O} = 0,016$ .

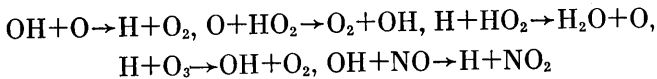
В случае заполнения баротрассы после вакуумирования сухим воздухом из баллона до давления  $p_\infty = 40$  торр абсолютная влажность воздуха по паспортным данным баллона составляла  $a = 0,3$  г/м<sup>3</sup>. В этом случае молярная концентрация водяных паров в баротрассе составляет  $\xi_{H_2O} = 4 \cdot 10^{-4}$ .

3. На основе приведенных оценок содержания паров воды были выполнены расчеты распределения неравновесных параметров в следе за моделью, летящей с гиперзвуковой скоростью. Использовался алгоритм рас-

чета неравновесного дальнего следа [4–6], модифицированный с учетом присутствия в набегающем потоке паров воды. В начальном сечении следа концентрации компонентов, присутствующих как в сухом, так и влажном воздухе, полагались равными. Концентрации водородосодержащих компонентов находились с учетом соотношений для химических элементов и отдельных рекомендаций [1]. На фиг. 1–3 показаны результаты расчетов осевого распределения параметров турбулентного следа за сферической моделью диаметром  $d=4,0$  мм, летящей со скоростью  $V_\infty=4,15$  км/с при  $p_\infty=40$  торр. Сплошные кривые на этих рисунках соответствуют сухому воздуху, штрихпунктирные — воздуху с парами воды при  $\xi_{\text{H}_2\text{O}}=0,016$ .

На фиг. 1 приведено осевое распределение мольно-массовых концентраций нейтральных химических компонентов, а на фиг. 2 — заряженных компонентов. Числовая концентрация электронов  $n_e$  ( $\text{см}^{-3}$ ) рассчитывается по соотношению  $n_e=\rho_\infty\rho N_A\gamma_e/m_\infty$ , где  $N_A$  — число Авогадро,  $m_\infty$  — молекулярный вес газа в набегающем потоке.

Отметим, что распределения температуры (фиг. 3) для сухого и влажного воздуха мало отличались друг от друга. Кружками на фиг. 3 обозначены результаты измерений температуры [21] для тех же условий. Изменение распределения концентраций  $\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$  при наличии паров воды обусловлено в основном протеканием следующих быстрых реакций:



Присутствие паров воды при указанных выше условиях приводит к уменьшению концентрации атомарного кислорода в 2 раза, озона — на порядок величины и увеличению концентрации  $\text{NO}_2$  в 2,5 раза при  $x \approx 2000$ . Изменение концентраций  $\text{O}$  и  $\text{O}_3$  вызывает изменение концентраций электронов и отрицательных ионов  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}_3^-$  (фиг. 2). Кроме того, на распределение электронной концентрации оказывает влияние образование  $\text{OH}^-$ . Положительные ионы  $\text{H}_3\text{O}^+$  быстро рекомбинируют и существенного влияния на  $\gamma_e$  не оказывают.

На фиг. 3 представлены результаты расчетов наблюдаемых параметров следа [4–6]: линейной концентрации электронов  $N_L$  ( $\text{см}^{-1}$ ) и интенсивности хемилюминесцентного излучения  $I_\lambda$  ( $\text{Вт}/\text{см}\cdot\text{стер}\cdot\text{мкм}$ ), обусловленной реакцией  $\text{NO}+\text{O}\rightarrow\text{NO}_2+h\nu$ . Вертикальными отрезками на фиг. 3 отмечены результаты измерений  $N_L$  в сухом воздухе [3]. Влияние паров воды усиливается с ростом  $x$ . При  $x \leq 1000$  отличие в распределениях электронной концентрации для сухого и влажного воздуха лежит в пределах точности измерений [2, 3]. Более заметное влияние оказывают пары воды на распределение интенсивности хемилюминесцентного излучения  $I_\lambda(x)$ . Кривые  $I_\lambda(x)$  для сухого и влажного воздуха на фиг. 3 отличаются уже при  $x \sim 500$ , а при  $x \sim 2000$  различие достигает 100%.

На фиг. 4 приведено сравнение результатов расчетов  $I_\lambda(x)$  (кривые 1) в сухом воздухе (сплошные кривые) и в воздухе с объемной концентрацией паров воды  $\xi_{\text{H}_2\text{O}}=5 \cdot 10^{-5}$  (штрихпунктирные кривые) при  $d=5$  мм,  $p_\infty=200$  торр,  $V_\infty=5$  км/с. Этот режим соответствует условиям эксперимента [22] по измерению интенсивности хемилюминесцентного излучения (вертикальные отрезки на фиг. 4). В [1] на основе экстраполяции данных по измерению влажности в баротрассе установки [22], полученных при  $p_\infty=100$  торр, получено, что при указанных выше условиях содержание паров воды составляло  $\xi_{\text{H}_2\text{O}}=5 \cdot 10^{-5}$ . Кривые 2 на фиг. 4 отмечают расчеты  $I_\lambda(x)$  из работы [1]. Результаты расчетов показывают, что столь малая концентрация водяного пара слабо влияет на распределение параметров дальнего следа. Увеличение начальной концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  приводит к лучшему согласованию с экспериментальными данными [22]. Вероятно, в экспериментах [22] содержание паров воды было выше, чем по оценкам [1].

Сравнение кривых 1 и 2 с экспериментальными данными на фиг. 4 показывает, что разработанная методика расчета и используемая модель химической кинетики позволяет более точно, чем по методу [1], рассчитывать параметры дальнего следа.

Из проведенных исследований следует, что при интерпретации результатов баллистических экспериментов по измерению интенсивности хемилюминесцентного излучения и электронной концентрации в дальнем воздушном следе при  $\xi_{\text{н.о.}} > 10^{-4}$  необходимо учитывать влияние водяных паров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schapker R. L., Camac M. NO<sub>2</sub> chemiluminescent wake radiation. AIAA Pap., 1968, № 68-702, 46 p.
2. Баулин Н. Н., Дмитриев А. К., Иванчинов-Маринский Н. Н., Лопатин В. Е., Пилюгин Н. Н., Чернявский С. Ю. Исследование течения за сферой при гиперзвуковой скорости полета в воздухе открытым СВЧ-резонатором. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1976, № 3, с. 156–160.
3. Бродский В. Б., Загик С. Е., Лютомский В. А., Мишин Г. И. Исследование распределения концентрации свободных электронов вдоль гиперзвукового следа методами радиодиагностики. — Журн. техн. физики, 1978, т. 48, № 5, с. 956–960.
4. Пилюгин Н. Н., Тихомиров С. Г., Чернявский С. Ю. Приближенный метод расчета параметров воздуха и интенсивности излучения в дальнем следе. — Изв. АН СССР, МЖГ, 1980, № 6, с. 165–175.
5. Пилюгин Н. Н., Тихомиров С. Г. Излучение дальнего следа за телом, летящим в воздухе с гиперзвуковой скоростью. — Тр. 4-й Всесоюз. конф. «Динамика излучающего газа», т. 2. М.: 1981, Изд-во МГУ, с. 146–152.
6. Пилюгин Н. Н., Тихомиров С. Г., Чернявский С. Ю. Неравновесный дальний след за телом, летящим в воздухе с гиперзвуковой скоростью. — В кн.: Гиперзвуковые пространственные течения при наличии физ.-хим. превращений. М.: Изд-во МГУ, 1981, с. 221–238.
7. Стулов В. П., Шкадова В. П. Об одномерном неравновесном течении воздуха. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1968, № 2, с. 81–86.
8. Камзолов В. Н., Пирумов У. Г. Расчет неравновесных течений в соплах. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1966, № 6, с. 25–33.
9. Cresswell J., Kaplan B., Porter R., Sarkos C. Material effects of low temperature ablators on hypersonic wake properties of slender bodies. — In: AGARD Conf. Proc., 1967, v. 2, № 19.
10. Langan W. T., Cresswell J. D., Browne W. G. Effects of ablation products on ionization in hypersonic wakes. — AIAA Journal, 1965, v. 3, № 12, p. 2211–2218.
11. Anderson L. B., Meyer J. W., McLean W. J. Turbojet exhaust reactions in stratospheric flight. — AIAA Journal, 1974, v. 12, № 1, p. 56–64.
12. Козарко С. М., Басевич В. Я. Теоретическое рассмотрение возможных схем снижения концентрации NO при горении. — Физика горения и взрыва, 1981, т. 17, № 5, с. 3–8.
13. Аравин Г. С., Власов П. А., Карасевич Ю. К., Маколкин Е. В., Нейгауз М. Г. Исследование механизма химической ионизации при высокотемпературном окислении метана в ударных волнах. — Физика горения и взрыва, 1982, т. 18, № 1, с. 49–57.
14. Ермолин Н. Е., Фомин В. М. К численному исследованию газодинамики сверхзвукового течения в канале при наличии неравновесных процессов. — Физика горения и взрыва, 1980, № 3, т. 16, с. 47–54.
15. Мак-Ивен М. Д., Филлипс Л. Ф. Химия атмосферы. М.: Мир, 1978. 375 с.
16. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981. 512 с.
17. Изаков М. Н., Красицкий О. П. Модель состава атмосферы Марса. — Космич. исследование, 1977, т. 15, № 3, с. 455–469.
18. Whitten R. C., Turco R. P. Perturbations of the stratosphere and mesosphere by aerospace vehicles. — AIAA Journal, 1974, v. 12, № 8, p. 1110–1117.
19. Кондрагьев В. Н. Константы скорости газофазных реакций (Справочник). М.: Наука, 1970. 351 с.
20. Физический энциклопедический словарь. Т. 1. М.: Сов. энциклопедия, 1960, с. 223.
21. Бродский В. Б., Загик С. Е., Лютомский В. А., Мишин Г. И. Измерение температурной зависимости коэффициента рекомбинации электронов в ионизованном воздухе на баллистической трассе. — Журн. техн. физики, 1978, т. 48, № 5, с. 961–963.
22. Reis V. H. Chemiluminescent radiation from the far wake of hypersonic spheres. — AIAA Journal, 1967, v. 5, № 11, p. 1928–1933.

Москва

Поступила в редакцию  
19.III.1984